

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

NÁVRH PROGRAMOVATELNÉHO ÚTLUMOVÉHO ČLENU

DESIGN OF A PROGRAMMABLE ATTENUATOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Rostislav Pokorný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Štůsek

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Rostislav Pokorný

ID: 164931

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Návrh programovatelného útlumového členu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude vytvoření elektronického zařízení, jež bude umožňovat plynulé nastavení útlumu v rozsahu 0 dB až 150 dB. Při návrhu uvažujte charakteristickou impedanci o hodnotě 50 Ω , rozsah pracovních kmitočtů odpovídající frekvenčním pásmům LTE (Long Term Evolution) a vstupní signál s maximální hodnotou výkonu +27 dBm. Vytvořené zařízení bude možné ovládat manuálně skrze tlačítka umístěná na těle přístroje, nastavená hodnota se bude zobrazovat na vestavěném displeji. Dále bude zařízení podporovat režim vzdáleného ovládání, který bude sloužit pro automatizovaná měření. Elektronické zařízení bude s řídicím počítačem spojeno skrze rozhraní USB (Universal Serial Bus) umožňující obousměrnou komunikaci. Komunikační rozhraní bude poskytovat funkce pro nastavení a vyčtení požadované hodnoty útlumu. Součástí práce bude také měření přesnosti útlumového členu pro různá frekvenční pásma.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MIDDLETON, Wendy M. Reference data for engineers: radio, electronics, computer, and communications. 9th ed. Boston: Newnes, 2002. ISBN 978-0-7506-7291-7.

[2] BHATTACHARYA, S. K. Network Analysis and Synthesis. 1. Chennai: Pearson Education India, 2015. ISBN 9789332558373.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Martin Štůsek

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce řeší návrh a realizaci programovatelného útlumového členu. Cílem bylo vytvoření elektronického zařízení, které umožňuje plynulé nastavení hodnoty útlumu v rozsahu 0–150 dB pomocí tlačítek a zobrazení nastavené hodnoty na displeji. Realizace probíhala na základě výběru vhodného digitálního atenuátoru s pracovní frekvencí v rozsahu 0 až 6 GHz, návrhem zapojení a výrobou čtyřvrstvé desky plošných spojů. Výsledkem je zařízení založené na 8bitovém mikrokontroléru ATmega328P–PU využívající pětici v sérii zapojených 6bitových digitálních atenuátorů s možností ručního a programového nastavení útlumu od 0–157,5 dB s krokem 0,5 a vizualizací dat na vestavěném displeji. Pomocí aplikace vytvořené v jazyku C#, je umožněno vzdálené nastavení a vyčtení hodnoty útlumu přes integrované USB (univerzální sériová sběrnice – Universal Serial Bus) komunikační rozhraní. V závěru je uvedeno zhodnocení výsledků měření útlumu zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální atenuátor, LPWAN, ATmega328P–PU, rádiový signál, ztráty šířením, šíření signálu

ABSTRACT

This Master's thesis focuses on design and implementation of programmable attenuator. The main aim of this thesis is to create an electronical device that provide continuous setting of attenuation value in the range between 0–150 dB. Setting a value from the range can be performed using buttons and set values are shown on display. For this thesis an attenuator with working frequency between 0–6 GHz was chosen and four-layer printed circuit board was designed. As a result the device is fitted with an 8bit microcontroller ATmega328P–PU using five 6bit digital attenuators connected in series with manual and program settings of attenuation from 0–157,5 dB with step of 0,5 dB. Data are shown on a build-in display. The application for remote settings and value reading over integrated USB (Universal Serial Bus) interface, was created in C#. In conclusion of this thesis there is a measurement evaluation of attenuation measurement performed on the device.

KEYWORDS

Digital attenuator, LPWAN, ATmega328P–PU, RF signal, path loss, signal propagation

POKORNÝ, Rostislav. *Návrh programovatelného útlumového členu*. Brno, 2020, 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: Ing. Martin Štůsek

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh programovatelného útlumového členu“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Martinovi Štůskovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Děkuji také svojí manželce a dětem za trpělivost a podporu během studia.

Obsah

Úvod	10
1 Šíření rádiových signálů	11
1.1 Základy šíření rádiových vln	12
1.1.1 Vlastnosti elektromagnetických vln	12
1.1.2 Rádiový kanál	13
1.1.3 Odraz a lom vlnění	14
1.1.4 Ohyb vlnění	14
1.1.5 Rozptyl vlnění	14
1.1.6 Ztráty šířením	15
1.1.7 Ztráty spojení	15
1.2 Modely šíření rádiových vln	16
1.3 Venkovní modely šíření	16
1.3.1 Friisův model	16
1.3.2 Okumura model	17
1.3.3 Hata model	18
1.3.4 Longley–Rice model	19
1.4 Nejpoužívanější bezdrátové technologie	19
1.4.1 Wi-Fi	19
1.4.2 Bluetooth	22
1.4.3 LPWAN technologie	25
1.4.4 LTE	28
1.4.5 GSM	28
2 Pasivní útlumový článek	31
2.1 Základní parametry útlumových článků	31
2.2 Základní rozdělení útlumových článků	32
2.2.1 Pevný atenuátor	32
2.2.2 Přepínatelný krokový atenuátor	33
2.2.3 Proměnný atenuátor	33
2.2.4 Útlumový článek typu L	33
2.2.5 Útlumový článek typu π	34
2.2.6 Útlumový článek typu T	35
3 Použitý hardware	37
3.1 Popis zařízení	37
3.2 Mikrokontrolér ATmega328P–PU	38

3.2.1	Zavaděč (Bootloader)	38
3.3	Digitální atenuátor	39
3.3.1	Komunikační rozhraní	41
3.4	LCD displej JHD162A	43
3.5	Rotační enkodér KY-040	43
3.6	USB–serial převodník CH340G	44
3.7	Deska plošného spoje	44
3.8	Vytvořené zařízení	46
3.8.1	Uživatelské menu	46
3.8.2	Návrh krabičky zařízení	47
3.9	Programové vybavení	48
3.9.1	Zdrojový kód zařízení	48
3.9.2	Aplikace pro vzdálenou obsluhu	50
3.9.3	Komunikační protokol	51
3.10	Měření útlumu digitálního útlumového členu	52
3.10.1	Měřicí pracoviště	52
3.10.2	Metodika měření	52
3.10.3	Výsledky měření	53
Závěr		55
Literatura		57
Seznam symbolů, veličin a zkratk		62
Seznam příloh		66
A Schéma zapojení DPS		67
B Seznam součástek		68
C Technická dokumentace DPS		70
D Naměřené hodnoty		72
E Obsah přiloženého CD		74

Seznam obrázků

1.1	Spektrum elektromagnetického vlnění	11
1.2	Poyntingův vektor	13
1.3	Mnohacestné šíření rádiového signálu	14
1.4	Schéma bezdrátového přenosového kanálu	15
1.5	Schéma Friisova rádiového kanálu	17
2.1	Schéma zapojení útlumového článku	31
2.2	Schéma zapojení přepínatelného útlumového článku	33
2.3	Schéma zapojení útlumového článku typu L	34
2.4	Schéma zapojení útlumového článku typu π	35
2.5	Schéma zapojení útlumového článku typu T	36
3.1	Blokové schéma programovatelného útlumového členu.	37
3.2	Rozložení vývodů mikrokontroléru ATmega328P-PU	38
3.3	Schéma zapojení pro vypálení zavaděče	39
3.4	Pouzdro QFN24 pro SMD montáž	40
3.5	Rozložení vývodů atenuátoru HMC624A	41
3.6	Princip komunikace mezi Master a Slave	42
3.7	Přehled režimů SPI rozhraní	42
3.8	Rotační enkodér KY-040	44
3.9	Displej 4x20	44
3.10	Deska plošného spoje ze strany spojů a ze strany součástek	45
3.11	Obrazovky uživatelského menu	46
3.12	Osazená deska plošného spoje	47
3.13	Návrh dvoudílné krabičky zařízení	48
3.14	Vývojový diagram zdrojového programu	49
3.15	Vyvinutá formulářová aplikace	50
3.16	Formát příkazu komunikačního protokolu	51
3.17	Blokové schéma měřicího pracoviště	53
3.18	Graf odchylky nastavené hodnoty útlumu	54
A.1	Schéma zapojení DPS	67
C.1	Deska plošného spoje – vrstva top	70
C.2	Deska plošného spoje – vrstva bottom	70
C.3	Deska plošného spoje – vrstva 2	71
C.4	Deska plošného spoje – vrstva 3	71

Seznam tabulek

1.1	Přehled standardů IEEE 802.11	22
1.2	Přehled 3 PHY vrstev Bluetooth 5.0 [39].	25
1.3	Přehled faktorů rozprostření	27
1.4	Přehled vlastností uvedených WAN technologií.	30
3.1	Pravdivostní tabulka digitálních vstupů.	40
3.2	Tabulka zapojení pinů LCD	43
3.3	Výsledky měření referenční intenzity signálu.	53
B.1	Tabulka použitých součástek 1/2.	68
B.2	Tabulka použitých součástek 2/2.	69
D.1	Tabulka naměřených hodnot.	73

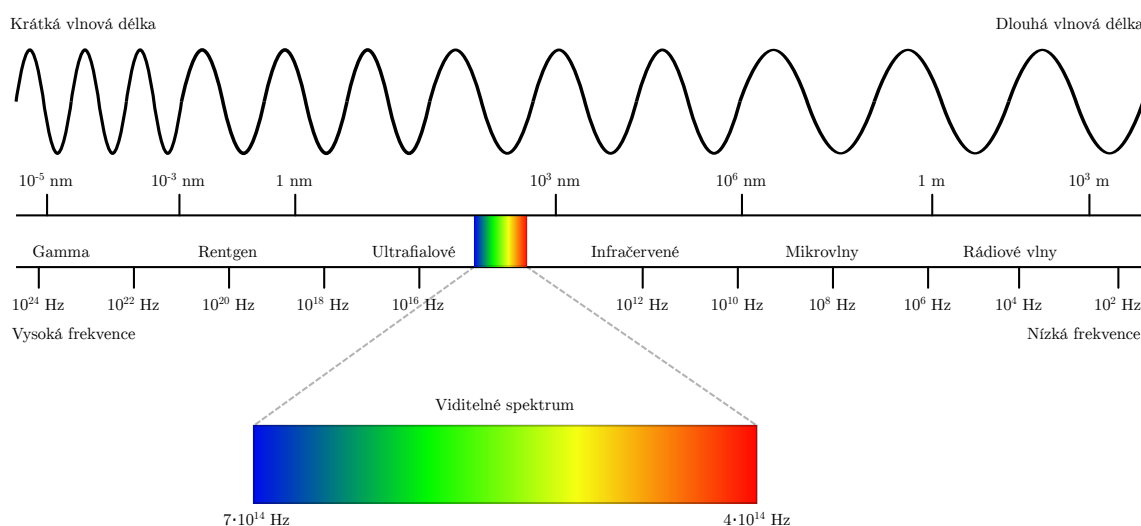
Úvod

Využívání zařízení pro internet věcí se v posledních letech stává čím dál běžnější praxí. Obecně lze internet věcí definovat jako systém komunikace jednotlivých zařízení mezi sebou bez nutnosti účasti nebo interakce člověka. Zařízení podporující koncept komunikace M2M (komunikace stroj–stroj – Machine to Machine) se uplatňují v oblastech každodenního života, jako je domácí automatizace, vzdálený odpočet odběru energií, chytré oblečení a jiné. To sebou přináší nové odvětví specifické využíváním LPWAN (nízkoenergetická rozlehlá síť – Low Power Wide Area Network), které charakterizuje přenos zpráv o malých objemech na velké vzdálenosti s nízkou frekvencí zasílání (hodiny/dny) a vysokými nároky na životnost baterie (10+ let). Maximální ztráty spojení u některých technologií dosahují více než 160 dBm. V těchto případech je velmi obtížné testovat limity technologií využitelných pro internet věcí v reálném provozu vzhledem k velkému množství interferencí, které zvláště v městském prostředí citelně ovlivňují přenosový kanál.

Cílem této diplomové práce je návrh a realizace programovatelného útlumového členu s maximálním útlumem 150 dB, který zajistí dostatečné utlumení vstupního signálu pro měření a analýzu jednotlivých LPWAN technologií. Teoretická část je zaměřena na problematiku šíření rádiových signálů s popisem modelů jejich chování ve venkovním prostředí a poskytuje přehled typů útlumových článků. Praktická část popisuje návrh a realizaci čtyřvrstvé desky plošných spojů společně s popisem jednotlivých komponent použitých při realizaci zařízení. Hlavními prvky navrženého programovatelného útlumového členu jsou 8bitový mikropočítač ATME1 a pětice v kaskádě zapojených 6bitových digitálních atenuátorů HMC624A, díky čemuž je dosaženo maximálního nastavitelného útlumu 157,5 dB s krokem 0,5. Hodnotu útlumu lze nastavit pomocí rotačního enkodéru umístěným na těle přístroje. Vizualizace nastavené hodnoty je realizována prostřednictvím integrovaného displeje. Napájení celého zařízení je navrženo skrze implementované USB (univerzální sériová sběrnice – Universal Serial Bus) rozhraní, které umožňuje režim vzdáleného ovládání. V tomto režimu je využito komunikační rozhraní vyvinuté desktopové aplikace, která uživateli umožňuje vzdáleně nastavit nebo vyčíst hodnotu útlumu digitální útlumového článku.

1 Šíření rádiových signálů

Bezdrátová komunikace je založena na přenosu informací pomocí elektromagnetického rádiového vlnění. K přenosu dat lze využít široké spektrum rádiových frekvencí viz obrázek 1.1. Druhy elektromagnetického vlnění lze dělit podle vlnové délky respektive frekvence. Jednotlivá pásma nejsou ostře ohraničena a přechod mezi nimi je plynulý.



Obr. 1.1: Spektrum elektromagnetického vlnění [9].

- **Gamma záření**, vlnová délka je menší než 100 pm, čemuž odpovídají frekvence nad 3 EHz. Jedná se o ionizující typ záření vznikající při jaderných reakcích. Gama záření využívá například Leksellův gama nůž k výkonu neurochirurgických operací.
- **Rentgenové záření** o vlnové délce 10 nm–1 pm a frekvenci od 30 PHz je ionizující záření vyznačující se schopností pronikat celou řadou materiálů. Toho se využívá především v lékařství k diagnostickým vyšetřením rentgenovými přístroji.
- **Ultrafialové záření**, jehož vlnová délka se pohybuje od 400–10 nm s frekvencí od 0,75 PHz–30 PHz se používá k dezinfekčním účelům protože dokáže ničit mikroorganismy. Přírodním zdrojem tohoto záření je Slunce.
- **Viditelné záření** s vlnovou délkou 780–400 nm a frekvenčním rozsahem přibližně 0,38 PHz–0,75 PHz vyvolává dopadem na fotocitlivé buňky v lidském oku zrakový vjem. Využívá se především v optických přístrojích. Záření ve viditelném spektru se používá i k lékařským účelům, například při fototerapii.
- **Infračervené záření**, vlnová délka 1–780 nm, frekvence 30 EHz–0,38 PHz. Zdrojem tohoto typu záření jsou například tělesa zahřátá na vyšší teplotu. Záření se využívá k přenosu informací na krátké vzdálenosti. Příkladem jsou

starší mobilní telefony a dálkové ovládání, kde zdrojem infračerveného záření je LED (elektroluminiscenční dioda – Light Emitting Diode), dalším využitím je infračervená spektroskopie pro přesné určení chemických látek.

- **Mikrovlnné záření** má rozsah vlnové délky 1 nm až 1 m, což odpovídá frekvencím 30 EHz–0,3 GHz. Mikrovlnné záření se využívá v mnoha oblastech, od mikrovlnné trouby k ohřevu potravin, přes sušení dřeva a knih, až po přenos dat pomocí technologie Wi-Fi, přenos televizního signálu nebo využití mikrovln v radarové a satelitní technice.
- **Rádiové záření** s vlnovou délkou 1 m až 30 km a frekvencí 0,3 GHz–1 kHz. Využívá se mimo jiné pro přenos rozhlasového a televizního signálu a mobilní komunikaci [13].

1.1 Základy šíření rádiových vln

Způsob jakým se šíří rádiové vlny je ovlivněn prostředím a prostorovou organizací vysílacího řetězce. Dalšími vlivy jsou charakter zemského povrchu, zejména jeho profil, drsnost a stav atmosféry. Nehomogenita prostředí vede ke vzniku odrazů signálu, jeho ohybu a interferenci způsobující pokles úrovně intenzity signálu.

1.1.1 Vlastnosti elektromagnetických vln

Elektromagnetické vlnění má obecně příčný charakter a neobsahuje podélnou složku orientovanou se směrem šíření. Elektromagnetické pole je explicitně definováno vektorem magnetického pole \vec{H} a vektorem elektrického pole \vec{E} , které jsou na sebe vzájemně kolmé a zároveň kolmé i na směr šíření, čímž je definován Poyntingův vektor, viz obrázek 1.2.

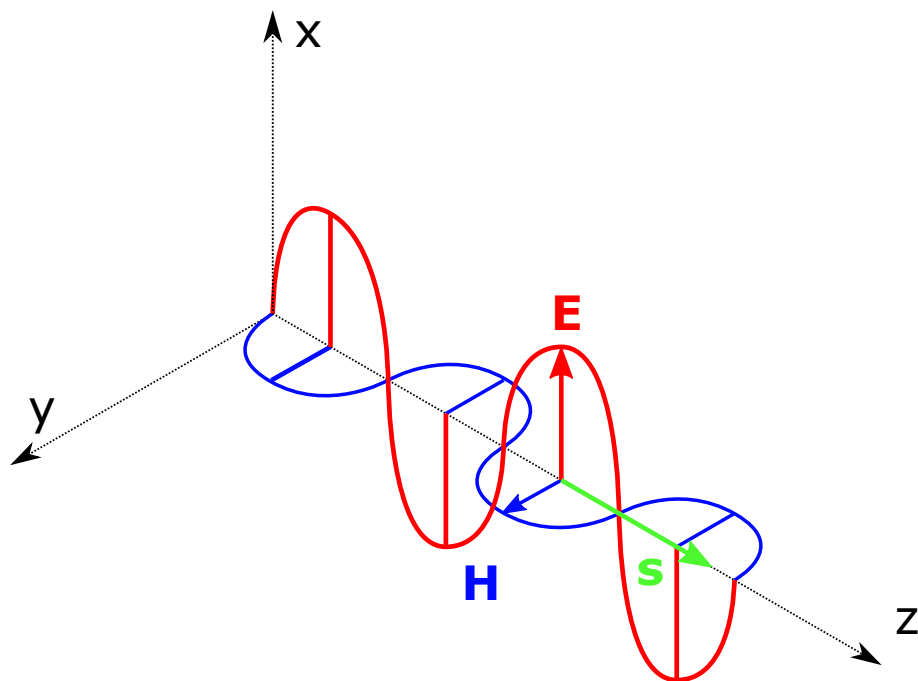
Vektorový součin okamžité hodnoty elektrického pole e a okamžité hodnoty magnetického pole h definuje okamžitou hodnotu Poyntingova vektoru $s(t)$:

$$s(t) = e \times h, \quad (1.1)$$

kde $s(t)$ je okamžitá hodnota Poyntingova vektoru, e je okamžitá hodnota intenzity elektrického pole a h je okamžitá hodnota intenzity magnetického pole.

Elektrická a magnetická složka vlny se prostorem šíří stejnou rychlostí. Na obě složky působí exponenciálně útlum vyjádřený útlumovou konstantou:

$$\alpha = \left(\frac{p \cdot \omega}{v} \right), \quad (1.2)$$



Obr. 1.2: Poyntingův vektor [11].

kde α je útlumová konstanta, p je index absorpce, ω je fázová rychlost a v je rychlost vlnění. Elektrické a magnetické pole jsou vzájemně posunuty o úhel β :

$$\beta = \arctan \frac{p}{n}, \quad (1.3)$$

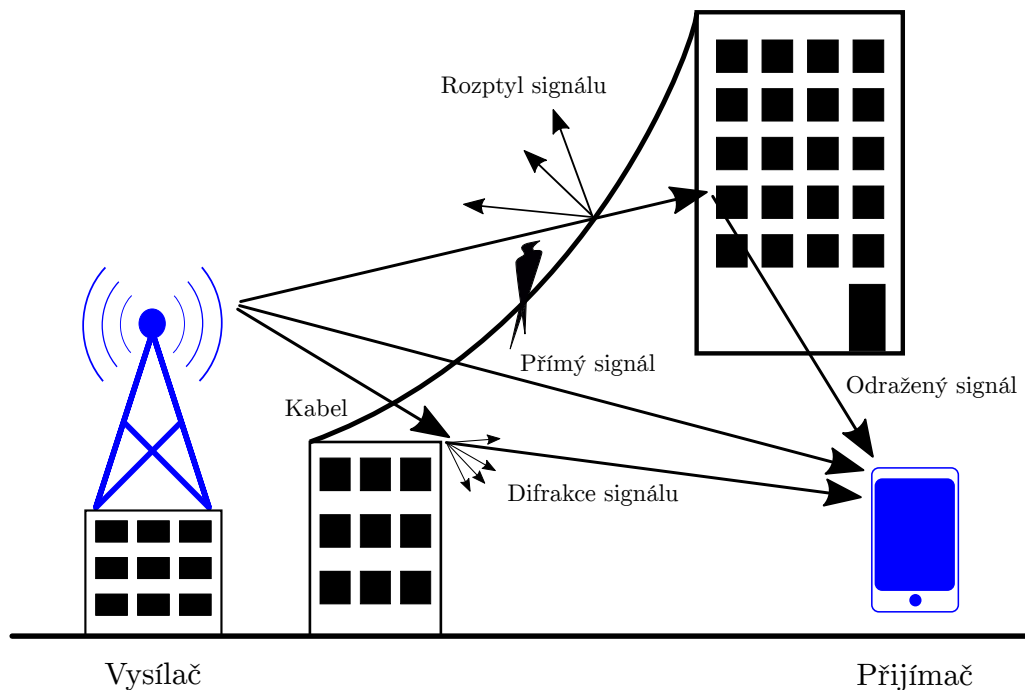
kde n je index lomu prostředí definovaný jako:

$$n = \left(\frac{c}{v} \right), \quad (1.4)$$

kde c je světelná rychlost a v je rychlost šíření vlny.

1.1.2 Rádiový kanál

Rádiový přenos je vystaven vysokému počtu vlivů, které ovlivňují míru spolehlivosti a rychlost komunikace. Bezdrátové komunikační systémy využívají mnoho fyzických médií s různými vlastnostmi, které jsou ovlivněny prostředím mezi vysílačem a přijímačem. Signál bezdrátové komunikace, který se šíří prostorem je tlumen v závislosti na povaze přenosového média. Při kontaktu s objekty dochází k další degradaci signálu jeho odrazem, lomem, ohybem a rozptýlením, viz obrázek 1.3. Kumulativní účinek má za následek absorpci signálu, vícecestné šíření signálu a posun frekvence signálu na základě Dopplerova efektu v případě vzájemného pohybu přijímače vůči vysílači [6].



Obr. 1.3: Mnohacestné šíření rádiového signálu [11].

1.1.3 Odraz a lom vlnění

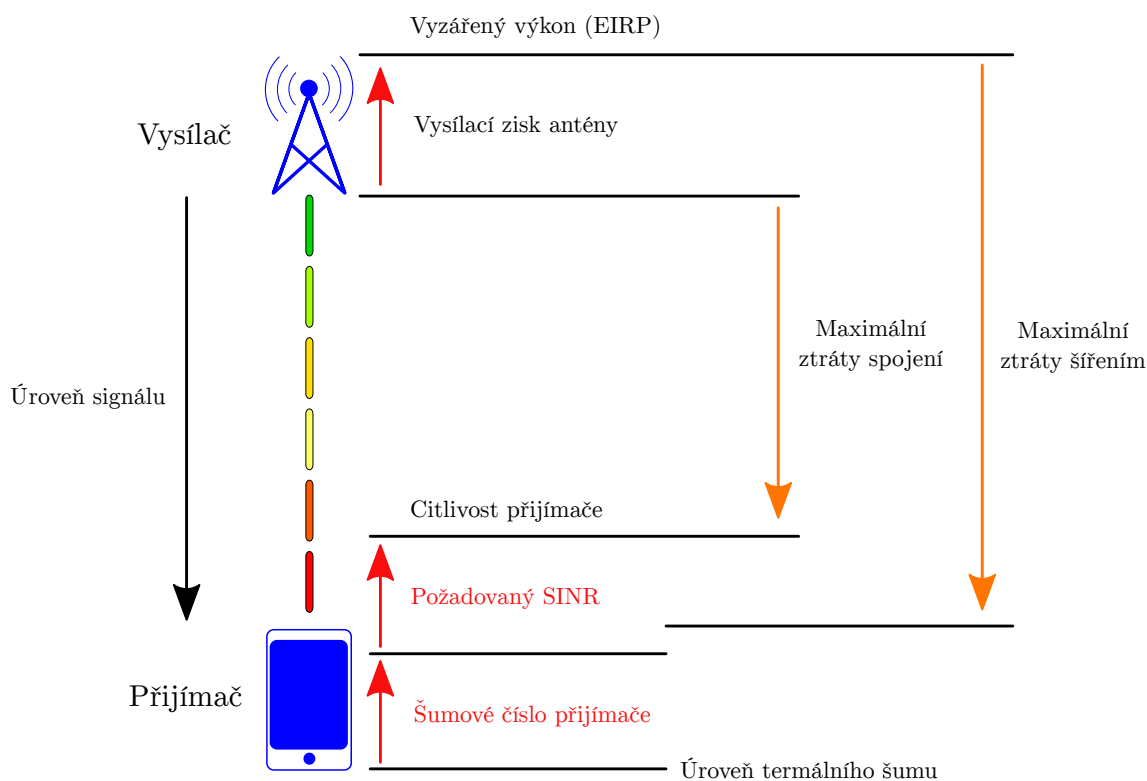
Při dopadu elektromagnetického vlnění na rovinné rozhraní dvou prostředí s odlišnými indexy lomu dochází k odrazu vlnění zpět do původního prostředí, viz obrázek 1.3. Úhel pod kterým se dopadající vlna odrazí je roven úhlu dopadu elektromagnetické vlny [3].

1.1.4 Ohyb vlnění

Lze charakterizovat jako průnik vlnění do míst, kde za normálních okolností je signálový stín, viz obrázek 1.3. Tato situace nastane v případě, kdy elektromagnetická vlna narazí na překážku, která je větší než vlnová délka signálu [3].

1.1.5 Rozptyl vlnění

K rozptylu dochází při dopadu elektromagnetických vln na rozhraní překážek jejichž velikost je výrazně menší než vlnová délka dopadajících vln. Tento jev nastává například při dopadech signálu na elektrické kabely mezi budovami, viz obrázek 1.3 nebo při nárazu elektromagnetického vlnění na dešťové kapky, listy stromů a podobně [3].



Obr. 1.4: Schéma bezdrátového přenosového kanálu [1].

1.1.6 Ztráty šířením

Ztráty šířením (Path Loss) lze vyjádřit jako poměr výkonu vysílaného signálu vůči výkonu přijatého signálu na přenosové cestě, viz obrázek 1.4. Odhad ztrát šířením je velmi důležitým krokem pro návrh a nasazení bezdrátových sítí. Ztráty jsou závislé na mnoha faktorech, mezi nejdůležitější patří rádiová frekvence a povaha terénu. Velikost ztrát při šíření signálu se zvyšuje exponenciálně se vzdáleností a je závislá i na prostředí, kterým se signál šíří [4, 6].

1.1.7 Ztráty spojení

Ztráty spojení (Coupling Loss) lze definovat jako ztráty, které vznikají na rozhraní mezi dvěma komponenty komunikačního obvodu. Za maximální ztráty spojení lze označit nejvyšší ztrátu vyzářeného výkonu, kterou komunikační systém dokáže tolerovat a být stále provozuschopný. Zpravidla jsou uváděny ve stejných jednotkách jako výkon daného prvku nebo obvodu. Nejčastěji ve wattech nebo decibelech [2, 6].

1.2 Modely šíření rádiových vln

Je experimentální matematická formulace charakterizující šíření rádiových vln jako funkci závislou na kmitočtu, vzdálenosti a dalších parametrech. Modely šíření jsou nezbytné pro návrh a plánování bezdrátových komunikačních systémů a jsou častým tématem odborného výzkumu. Model popisuje chování signálu od okamžiku vyslání vysílačem směrem k přijímači a ztráty signálu jeho šířením. Modelování ztrát šířením je důležité pro určení pokrytí oblasti signálem a analýzu jeho interference, což jsou základní parametry pro návrh bezdrátového přenosového systému [4].

Modely šíření dělíme na:

- **empirické modely:** založeny na naměřených datech a několika parametrech, využívají statistické vlastnosti a vykazují nízkou přesnost,
- **částečně deterministické modely:** využívají kombinaci empirických a deterministických aspektů,
- **deterministické modely:** specifické pro dané umístění, vyžadují velké množství geometrických informací o místě aplikace, vyznačují se velkou přesností [4].

Z hlediska místa použití dělíme modely na venkovní modely šíření a vnitřní modely šíření [6].

1.3 Venkovní modely šíření

V mobilní komunikaci často dochází k přenosu signálu přes různorodý terén. Profil terénu může být charakterizován jednoduchým zakřivením zemského povrchu až po tvarově složitý profil horského masivu. Pro odhad ztrát šířením je nezbytné vzít do úvahy i stromy, budovy, vodní plochy, hory atp. Modelů popisujících šíření signálu ve venkovním prostředí je několik, v další části budou popsány čtyři nejpoužívanější [4, 6].

1.3.1 Friisův model

Popisuje šíření signálu volným prostředím, kdy se uvažuje s přímou cestou signálu mezi vysílačem a přijímačem bez útlumu atmosférou, viz obrázek 1.5. Vlastnosti přenosového prostředí jsou definovány aditivním bílým Gaussovským šumem (aditivní bílý Gaussovský šum – Additive White Gaussian Noise). Model vychází z Friisovi radiokomunikační rovnice:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d} \right)^2, \quad (1.5)$$

kde P_r je přijatý výkon, P_t je vyzářený výkon, G_t je zisk vysílací antény, G_r je zisk přijímací antény, λ je vlnová délka a d je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem [6].

Friisova radiokomunikační rovnice nebere v potaz jakékoli ztráty v přenosovém médiu, které by mohly způsobit útlum signálu. V atmosféře při frekvencích od 100 MHz do 5 GHz lze ztráty obecně zcela zanedbat [6, 7].



Obr. 1.5: Schéma Friisova rádiového kanálu [12].

Ztráty šířením volným prostředím

Ztráty volným šířením (Free Space Path Loss) lze definovat jako množství energie, které daná rádiová vlna ztratí během cesty od vysílače k přijímači. Ztráty jsou závislé na vzdálenosti a frekvenci a lze je vypočítat dle následující rovnice:

$$L_{\text{FSL}}(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 92,45, \quad (1.6)$$

kde L_{FSL} jsou ztráty volným šířením, d je vzdálenost od vysílače a f je frekvence signálu [6].

1.3.2 Okumura model

Je empirický model šíření signálu, který vznikl na základě měření uskutečněných v Tokiu a jeho okolí v roce 1968. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších modelů pro použití v městském prostředí s hustou zástavbou, ale bez výškových budov. Lze ho aplikovat na frekvence v rozmezí 150–1920 MHz (možné extrapolovat do 3 GHz) a vzdálenostech od 1 km do 100 km. Stal se základem pro Hata model. Okumura stanovil soubor křivek, které určují střední útlum vztahený k volnému prostředí v městském prostředí přes zdánlivě nenáročný terén [6].

Formální vyjádření Okumurova modelu:

$$L = L_{\text{FSL}} + A_{\text{MU}} - H_{\text{MG}} - H_{\text{BG}} - \sum K_{\text{correction}}, \quad (1.7)$$

kde L je medián ztrát šířením, L_{FSL} jsou ztráty volným prostředím, A_{MU} je medián útlumu, H_{MG} je zisk mobilní antény, H_{BG} je zisk základové antény a $K_{\text{correction}}$ je výkonový faktor korekce [4, 6].

1.3.3 Hata model

Označován také jako Okamura–Hata je vhodný pro městské oblasti s vysokou mírou zastavěnosti a je založen na grafických informacích Okumura modelu, které dále rozvíjí k určení vlivu odrazu, ohybu, lomu a rozptylu způsobených prvky městské zástavby. Použitelný pro frekvence 150–1500 MHz, vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem 1–20 km. Stejně jako v případě Okumurova modelu, jsou i zde varianty pro městské, příměstské a otevřené oblasti. Model definuje medián ztrát šířením v závislosti na frekvenci, vzdálenosti mezi základnovou stanicí a anténou mobilního přijímače. Hata model definuje městskou oblast jako referenční a aplikuje následující korekční faktory [6, 8].

Pro městskou oblast:

$$L_{\text{dB}} = A + B \cdot \log_{10} R - E, \quad (1.8)$$

Pro příměstskou oblast:

$$L_{\text{dB}} = A + B \cdot \log_{10} R - C, \quad (1.9)$$

Pro otevřenou oblast:

$$L_{\text{dB}} = A + B \cdot \log_{10} R - D, \quad (1.10)$$

kde dále platí:

$$A = 69,55 + 26,16 \cdot \log_{10} f_c - 13,82 \cdot \log_{10} h_b, \quad (1.11)$$

$$B = 44,9 - 6,55 \cdot \log_{10} h_b, \quad (1.12)$$

$$C = 2 \cdot \left(\log_{10} \left(\frac{f_c}{28} \right) \right)^2 + 5,4, \quad (1.13)$$

$$D = 4,78 \cdot (\log_{10} f_c)^2 + 18,33 \cdot \log_{10} f_c + 40,94, \quad (1.14)$$

$$E = 3,2 \cdot (\log_{10} (11,7554 \cdot h_m))^2 - 4,97, \quad (1.15)$$

$$E = 8,29 \cdot (\log_{10} (1,54 \cdot h_m))^2 - 1,1, \quad (1.16)$$

kde pro velká města platí: $f_c \geq 300 \text{ MHz}$

$$E = 8,29 \cdot (\log_{10} (1,54 \cdot h_m))^2 - 1,1, \quad (1.17)$$

kde pro velká města platí: $f_c < 300 \text{ MHz}$

$$E = (1,1 \cdot \log_{10} f_f - 0,7) \cdot h_m - (1,56 \cdot \log_{10} f_f - 0,8), \quad (1.18)$$

kde L_{dB} je medián ztrát šířením h_b je výška antény základové stanice nad okolním terénem, h_m je výška antény mobilní stanice nad okolním terénem, f_c je frekvence nosné [4, 6].

1.3.4 Longley–Rice model

Označován také jako ITM (model nepravidelného terénu – Irregular Terrain Model) je aplikovatelný na komunikační systémy s dvoubodovým spojem ve frekvenčním pásmu 40 MHz–100 GHz v různých typech terénu. Hlavní ztráty přenosem jsou odhadovány z geometrie dráhy profilem terénu a lomem od troposféry. Model je dostupný jako počítačový program pro výpočet velkých ztrát přenosu v poměru ke ztrátám volným prostředím v nepravidelném terénu [6].

1.4 Nejpoužívanější bezdrátové technologie

V následujících částech jsou uvedeny nejpoužívanější technologie pro bezdrátový přenos včetně jejich charakteristických vlastností.

1.4.1 Wi-Fi

Wi-Fi je univerzální bezdrátová síťová technologie využívající rádiové vlny k přenosu dat. Wi-Fi technologie umožňuje vysokorychlostní přístup k internetu bez použití kabelů. Komunikační systémy založené na technologii Wi-Fi využívají dvě základní přenosové techniky.

802.11 legacy

První standard byl uveřejněn v roce 1997 a využíval tři metody přenosu FHSS (frekvenční přeskokování rozprostřeným spektrem – Frequency Hopping Spread Spectrum) a DSSS (technika přímého rozprostřeného spektra – Direct Sequence Spread Spectrum) ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Třetí metoda přenosu využívala difúzní infračervené záření. Díky možnosti výběru ze dvou metod přenosu docházelo k nekompatibilitě zařízení stejného standardu. Proto bylo při vývoji dalších standardů od techniky FHSS z velké části upuštěno. Maximální přenosová rychlost byla u infračerveného přenosu 1 Mbit/s, u rádiových technik 2 Mbit/s. Standard využíval přístupovou metodu CSMA/CA (vícenásobný přístup s nasloucháním nosné a předcházením kolizím – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Šířka kanálu byla stanovena na 20 MHz [20, 27].

802.11a

Standard 802.11a využívá techniku vícenásobného přístupu OFDM (ortogonální multiplex s frekvenčním dělením – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Tato přístupová technika rozdělí dostupné rádiové pásmo do 64 subkanálů a některé bity z datového toku jsou posílány do každého subkanálu. Vysílač kóduje bitový tok na 64 subnosných použitím modulace BPSK (Binární — fázové klíčování – Binary–Phase Shift Keying), QPSK nebo některou z modulací QAM (kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation). Kombinace nové metody přístupu a vyšších modulačních schémat přinesla výrazné zvýšení maximální přenosové rychlosti na 54 Mbit/s. Poprvé je využíváno frekvenční pásmo 5 GHz, což přináší výhodu vzhledem vysokému využití 2,4 GHz pásma. Nevýhodou použití 5 GHz pásma je menší dosah, jelikož elektromagnetické vlny jsou snadněji pohlcovány pevnými překážkami [20, 27].

802.11b

Standard 802.11b s maximální přenosovou rychlostí 11 Mbit/s používá DSSS s modulačním schématem CCK (doplňkové klíčování kódu – Complementary Code Keying). Bitový tok je zpracován speciálním kódováním a následně modulován technikou QPSK (kvadrurní klíčování fázovým posuvem – Quadrature Phase Shift Keying) [20, 27].

802.11n

Standard s označením 802.11n umožňuje jako první využívat frekvenční pásmo 2,4 a 5 GHz, avšak podpora 5 GHz pásma není povinná. Cílem při návrhu tohoto stan-

dardu bylo dosažení reálných přenosových rychlostí přesahujících 100 Mbit/s. Toho bylo mimo jiné dosaženo implementací technologie MIMO (vícenásobný vstup vícenásobný výstup – Multiple-Input Multiple-Output), která využívá více antén pro mnohacestného šíření signálu za účelem zvýšení datové propustnosti. Označení podpory technologie MIMO je zpravidla ve formátu $a \times b : c$, kdy a označuje maximální počet vysílacích antén, b označuje maximální počet přijímacích antén a c maximální počet datových prostorových proudů. Norma 802.11n podporuje maximální konfiguraci $4 \times 4 : 4$. Standard využívá pouze jednu techniku vícenásobného přístupu OFDM. Úpravy na podvrstvě MAC (řízení přístupu k médiu – Media Access Control) linkové vrstvy umožňují efektivnější využití 20 a 40 MHz šířky pásma. Všechny výše zmíněné vlastnosti standardu umožňují dosažení maximální teoretické přenosové rychlosti 600 Mbit/s [20, 27].

802.11ac

Nástupnický standard 802.11ac, označován také jako Wi-Fi 5, dosahuje maximální přenosové rychlosti 6,93 Gbit/s. Hlavními změnami oproti předchozímu standardu 802.11n jsou zejména využití pouze 5 GHz frekvenčního pásma společně s rozšířením šířky pásma na 80 MHz, volitelně až na 160 MHz. Dále je to podpora až 8 datových prostorových kanálů a použití 256QAM modulace oproti 64QAM využívané u standardu 802.11n. U pokročilé vysílací techniky došlo k implementaci technologie MU-MIMO (více uživatelů vícenásobný vstup vícenásobný výstup – Multi-user Multiple-Input Multiple-Output), která umožňuje obsloužit několik zařízení vytvořením většího počtu současných datových prostorových toků. Díky tomu je dosaženo nižší odezvy a vyšší propustnosti [20, 27].

802.11ax

Nejnovější standard 802.11ax (Wi-Fi 6) přináší mnohá vylepšení oproti předchozímu standardu 802.11ac, zejména co se týče nasazení v oblastech s vysokou hustotou uživatelů, spektrální účinnosti a uživatelského přístupu. Využívá modulaci 1024 QAM, kdy je každý symbol adresován 10 bity místo 8 bitů u modulace 256QAM používané standardem 802.11ac. To přináší zvýšení maximální přenosové rychlosti až na 10,53 Gbit/s. Další inovací je podpora MU-MIMO technologie i v vzestupném směru. V místech s vysokou hustotou provozu a uživatelských přístupů, jako jsou sportovní stadiony, kongresová centra nebo přestupní uzly najde uplatnění nově implementovaná technologie BSS Coloring (Basic Service Set Coloring). Jejím hlavním úkolem je zabránit interferencím mezi zařízeními daných buněk v situaci, kdy se překrývají zóny dosahu dvou přístupových bodů, které vysílají na stejném kanálu. Principem je značení odesílaných dat daného přístupového bodu přidáním identifikátoru, který

definuje barvu daného kanálu. Barevné odlišení umožňuje přístupovým bodům se rozhodnout, zda je simultánní využití stejného spektra přípustné. Snížení spotřeby elektrické energie a vyšší spektrální účinnost přináší technologie TWT (čas probuzení cíle – Target Wake Time), která byla jako koncept vyvinuta pro standard 802.11ah již v roce 2007. Technologie umožňuje každé stanici si s přístupovým bodem vyjednat časové okno pro vysílání a příjem paketů, zatímco v době mimo tato okna zůstávají v režimu spánku. Přístupový bod má také možnost seskupovat zařízení do skupin s vyhrazenými časovými okny, což snižuje počet zařízení, které se musí podělit o dostupné kapacity bezdrátového média [20, 27].

Kompletní přehled modulačních technik a přenosových rychlostí jednotlivých standardů 802.11 je uveden v tabulce 1.1.

Tab. 1.1: Přehled standardů IEEE 802.11 [20].

Datum vydání	Standard	Označení	Frekvenční pásmo [GHz]	Šířka pásma [MHz]	Multiplexování	Pokročilá vysílací technologie	Maximální přenosová rychlost
1997	802.11	–	2,4	20	DSSS, FHSS	–	2 Mbit/s
1999	802.11a	Wi-Fi 1	5	20	OFDM	–	54 Mbit/s
1999	802.11b	Wi-Fi 2	2,4	20	DSSS	–	11 Mbit/s
2003	802.11g	Wi-Fi 3	2,4	20	DSSS, OFDM	–	54 Mbit/s
2009	802.11n	Wi-Fi 4	2,4; 5	20; 40	OFDM	MIMO	600 Mbit/s
2013	802.11ac	Wi-Fi 5	5	20; 40; 80; 160	OFDM	MIMO, MU-MIMO	6,93 Gbit/s
2019	802.11ax	Wi-Fi 6	2,4; 5	20; 40; 80; 160	OFDM	MIMO, MU-MIMO	10,53 Gbit/s

1.4.2 Bluetooth

Je bezdrátová komunikační technologie s přenosem dat na menší vzdálenosti umožňující uživateli například přenos hlasu mezi mobilním telefonem a Hands-Free slu-

chátkem, streamování hudby nebo používání bezdrátových periférií osobního počítače. Technologie Bluetooth byla navržena pro spolehlivý přenos v prostředích, kde dochází k rušení na stejné frekvenci. Rádiové rozhraní Bluetooth pracuje v pásmu ISM (průmyslový, vědecký a zdravotnický — Industrial, Scientific and Medical) na frekvenci 2,4 GHz, šířka frekvenčního pásma pro Evropu a většinu ostatních zemí je 2,4 GHz (2400–2483,5 MHz) [25].

Bluetooth 1.0

Při vývoji standardu Bluetooth bylo rozhodnuto využít systému FH (frekvenční skákání — Frequency Hopping) namísto DSSS, jelikož je schopen pracovat ve větším dynamickém rozsahu. Při použití systému DSSS, by vysílače umístěné v blízkosti přijímače blokovali požadovaný přenos. Rádiové rozhraní systému Bluetooth využívá modulační techniku GFSK (Gaussovo frekvenční klíčování — Gaussian Frequency Shift Keying). Pro přenos je využíváno 79 přenosových kanálů o šířce 1 MHz [25].

Bluetooth 2.0 EDR

Druhá generace standardu označovaná Bluetooth 2.0 EDR (vylepšená přenosová rychlost – Enhanced Data Rate) používá modulaci PSK (fázové klíčování — Phase Shift Keying), která umožňuje dosažení přenosové rychlosti až 3 Mbit/s. Obecně jsou použity dvě varianty tohoto typu modulace. $\pi/4$ DQPSK (diferenční kvadrurní fázové klíčování – Differential Quadriphase (Quadrature) Shift Keying) umožňuje dosažení přenosové rychlosti 1 Mbit/s a 8DPSK modulace, se kterou lze dosáhnout přenosu dat rychlostí až 3 Mbit/s [25].

Bluetooth 3.0+ HS

Třetí verze standardu nese označení Bluetooth 3.0+ HS (vysoká rychlost – High Speed) a umožňuje dosažení maximální teoretické přenosové rychlosti až 24 MBit/s. Této rychlosti je dosaženo implementací podpory protokolu 802.11 PAL (Protocol Adaptation Layer), který umožňuje využívat spojovou a částečně linkovou vrstvu standardu 802.11, ostatní vrstvy jsou zcela odlišné a zůstávají v režii technologie Bluetooth. Nový typ protokolu společně s upravenou fyzickou vrstvou PHY a podvrstvou MAC tvoří alternativní AMP (alternativní MAC PHY – Alternate MAC PHY). Díky tomu je možné využívat hardware bezdrátových modulů Wi-Fi a realizovat přes něj přenos dat mnohonásobně větší rychlostí než u Bluetooth 2. Při takovém přenosu Bluetooth zajišťuje vyhledávání zařízení, konfiguraci a inicializaci spojení, ale přenos většího objemu dat je zajištěn pomocí alternativní MAC PHY. To má za následek mimo jiné i snížení spotřeby zařízení, jelikož přenos dat trvá výrazně kratší dobu [25].

Bluetooth 4.0

Standard Bluetooth 4.0 označován také jako Bluetooth Smart, byl vyvíjen s důrazem na nízkou spotřebu zařízení. Snížení spotřeby zajišťuje implementace nové přenosové techniky Bluetooth LE (Low Energy). Zařízení je většinu času udržováno v režimu spánku a k probuzení dochází pouze na dobu, po kterou probíhá aktivní komunikace. Primárním účelem tohoto standardu není nahradit předchozí Bluetooth 3.0+ HS, které je určeno zejména pro přenos audiovizuálního obsahu a proto klesla maximální přenosová rychlost na 1 Mbit/s. Tento standard je vhodný zejména pro přenos malých objemů dat, což ho předurčuje pro použití ve zdravotních senzorech jako jsou krokoměry, měřiče srdeční činnosti nebo glukometry, které nejčastěji komunikují s chytrým telefonem nebo fitness náramkem. Uplatnění najde i v oblasti průmyslových senzorů nebo chytré domácnosti. Bluetooth 4.0 využívá stejné frekvenční pásmo 2,4 GHz jako Bluetooth verze 1.0 a stejnou GFSK modulaci, ale s větším modulačním indexem, což má za následek zvýšení dosahu ve volném prostředí až na 100 m. Šířka přenosového kanálu je 2 MHz a jejich celkový počet je 40. Maximální vysílací výkon zařízení je 15 mW a maximální proudový odběr 15 mA. Výrazně se snížila i doba odezvy, která je 6 ms. Standard umožňuje zabezpečit komunikaci pomocí 128bitové blokové šifry AES (standard pokročilého šifrování – Advanced Encryption Standard) [25, 38].

Bluetooth 5.0

Standard Bluetooth 5.0 přináší vylepšení oproti předchozí generaci zejména v oblasti přenosové rychlosti a dosahu. Maximální přenosová rychlost se zvýšila na 2 Mbit/s díky úpravám na fyzické vrstvě. Bluetooth 5.0 nově přidává další dvě specifikace PHY s označením LE 2M a LE Coded, viz tabulka 1.2. PHY vrstva s označením LE 1M použitá u předchozího standardu Bluetooth 4.0 je i nadále podporována. LE 2M PHY umožňuje dosažení modulační rychlosti 2 MS/s a tím i vyšší přenosové rychlosti. Zvýšení dosahu je oproti předchozímu standardu teoreticky čtyřnásobné. Vyššího dosahu je dosaženo implementací mechanismu FEC (dopředná korekce chyb – Forward Error Correction) do PHY vrstvy LE Coded. Díky tomu lze data dekodovat s nižším SNR (odstup signál/šum – Signal Noise Ratio) a tedy ve větší vzdálenosti od vysílače. To je základní princip zvýšeného dosahu standardu Bluetooth 5.0. LE Coded umožňuje použití dvou kódovacích schémat S=2 a S=8, výběr schématu S=2 umožňuje dvojnásobné zvýšení dosahu přenosu, ale za cenu snížení maximální přenosové rychlosti na 500 kbit/s. Schéma S=8 zvyšuje dosah čtyřnásobně, ale vzhledem k většímu množství redundantních dat pro zajištění dopředné korekce chyb dochází k navýšení počtu symbolů, které je potřebné přenést, což vede ke snížení přenosové rychlosti. V případě schématu S=8 až na 125 kbit/s [39].

Tab. 1.2: Přehled 3 PHY vrstev Bluetooth 5.0 [39].

	LE 1M	LE Coded S=2	LE Coded S=8	LE 2M
Modulační rychlost	1 MS/s	1 MS/s	1 MS/s	2 MS/s
Přenosová rychlost	1 Mbit/s	500 kbit/s	125 kbit/s	2 Mbit/s
Detekce chyb	CRC	CRC	CRC	CRC
Korekce chyb	—	FEC	FEC	—
Násobek zvýšení dosahu	1x	2x	4x	0.8x
Implementace v BT 5.0	povinně	volitelně	volitelně	volitelně

1.4.3 LPWAN technologie

LPWAN (nízkoenergetická rozlehlá síť – Low Power Wide Area Network) je typ bezdrátové komunikační sítě, která je navržena pro přenos malých objemů dat na velkou vzdálenost mezi připojenými objekty. Technologie je projektována pro podporu IoT (internet věcí – Internet of Things), který je charakterizován připojením velkých množství zařízení jako jsou například pohybové, teplotní, kouřové a jiné typy senzorů, které jsou zpravidla napájeny baterií.

Existuje velké množství standardů a technologií, které lze využít pro připojení zařízení internetu věcí. V následujícím textu budou blíže popsány čtyři technologie: NarrowBand – Internet of Things (NB-IoT), LTE-M (Long Term Evolution category M1), LoRaWaN a Sigfox [19, 26].

NarrowBand – Internet of Things

Je úzkopásmová komunikační technologie představená v roce 2016, která se zaměřuje na flexibilitu nasazení, nízkou spotřebu, dlouhou životnost baterií, nízké náklady při realizaci zařízení a dobré pokrytí signálem i v těžko přístupných podzemních prostorech. NB-IoT není kompatibilní s 3G, ale může být nasazen v pásmech GSM, GPRS nebo LTE. K zajištění podpory v infrastruktuře LTE většinou postačuje aktualizace softwaru bez nutnosti její výměny. Šířka pásma NB-IoT je 200 kHz, pokrytí do vzdálenosti až 15 km (při maximálních ztrátách spojení 164 dB) umožňuje v jedné buňce připojení až 50000 koncových zařízení. Vysoké hodnoty pokrytí je dosaženo zejména díky repetitivitě, což označuje několikanásobné opakované vysílání signálu. V sestupném směru je možné opakovat vysílání až 2048krát, v opačném směru 128krát. Tímto způsobem je možné zvýšit zisk až o 20 dB. Citlivost přijímače je -141 dBm. Pro vstupný směr je použita technika mnohonásobného přístupu SC-FDMA (frekvenčně dělený vícenásobný přístup s jednou nosnou – Single Carrier Frequency Division Multiple Access) a modulace $\pi/2$ BPSK nebo $\pi/4$ QPSK umožňující maximální

přenosovou rychlost 22,3 kb/s, pro sestupný směr je rychlost omezena na 67,8 kb/s při použití ortogonálního FDMA. Maximální vysílací výkon pro sestupný směr je 37 dBm, pro vzestupný směr 23 dBm [10, 19, 23, 26].

LTE–M

Plným označením LTE–eMTC (Long Term Evolution Enhancements for Machine Type Communications) je standard LPWA, který byl uveden společností 3GPP (Partnerský projekt třetí generace – The 3rd Generation Partnership Project). LTE–M je považována za jednu z prvních LPWA technologií první generace. Využívá stávající sítě LTE, což umožňuje snadnou implementaci a nasazení technologie. Vzhledem k potřebě snížení energetické náročnosti zařízení a splnění systémových požadavků LTE byla maximální přenosová rychlost snížena z kategorie LTE 1 na LTE 0, což odpovídá 1 Mbit/s pro oba komunikační směry. Další snížení režie umožňuje podpora volitelného plného nebo polovičního duplexu s podporou TDD (duplex s časovým dělením – Time Division Duplex) a FDD (duplex s frekvenčním dělením – Frequency Division Duplex). Šířka pásma 1,4 MHz společně s omezením vysílacího výkonu má za následek snížení nákladů a úsporu energie. Vysílací výkon zařízení je stanoven na 20 dBm, maximální ztráty spojení 160,7 dB. Při komunikaci v vzestupném směru je využívána technika mnohonásobného přístupu (ortogonální frekvenčně dělený vícenásobný přístup – Orthogonal Frequency Division Multiple Access) OFDMA, v sestupném směru je použita technika SC–FDMA. Pro oba směry komunikace jsou využívány modulace QPSK a 16QAM. Maximální citlivost přijímače je -129 dB [23, 26].

LoRaWaN

Technologie je založena na modulaci CSS (Chirp Spread Spectrum) s rozprostřeným spektrem. Při použití v Evropě má 10 kanálů s šířkou 125 kHz pro sestupný směr, šířka pásma pro vzestupný směr je 125 kHz nebo 250 kHz. V Severní Americe využívá technologie celkem 80 kanálů, z nichž 64 kanálů má šířku 125 kHz. 8 kanálů v vzestupném i sestupném směru má šířku 500 kHz. Technologie pracuje v bezlicenčních frekvenčních pásmech 433, 868 a 913 MHz a umožňuje přenos na velké vzdálenosti, typicky až 15 km v příměstských oblastech. Při využití technologie v Evropě je uplatněno omezení střídy maximálně 1%. Maximální vysílací výkon v vzestupném i sestupném směru je 16 dBm. Technologie využívá na fyzické vrstvě proprietární modulaci LoRa, která používá šest SF (faktor rozprostření – Spreading Factor) faktorů (SF7–SF12). Základním principem rozprostřeného spektra je, že každý bit informace je kódován jako vícenásobný čirp. V rámci dané šířky pásma se

poměr mezi bity a čirpy mění podle zvoleného faktoru rozprostření. Obecně nižší faktor rozprostření znamená vyšší přenosovou rychlost, viz tabulka 1.3, zároveň ovšem snížením faktoru dochází ke snížení citlivosti přijímače, její maximální hodnota je -137 dBm pro koncové zařízení a -142 dBm pro brány. Maximální rozsah rychlost přenosu dat je 293 b/s–5,34 kb/s. Maximální velikost přenášené zprávy je stanovena na 243 B. Maximální ztráty spojení jsou pro vzestupný směr 154 dB, pro sestupný 152 dB [19, 23, 24].

LoRaWaN rozlišuje 3 třídy zařízení:

- Třída A – koncová zařízení s podporou obousměrné komunikace, po každém vysílání dat následují dvě okna pro příjem dat.
- Třída B – zařízení této třídy otevírají mimořádná okna pro příjem dat v nastavené době.
- Třída C – okna pro příjem dat jsou neustále otevřena a k jejich uzavírání dochází jen při vysílání dat [24].

Tab. 1.3: Přehled faktorů rozprostření [23].

Faktor rozprostření	Přenosová rychlost [b/s]	Citlivost [dBm]	LoRa demodulátor SNR [dB]
7	5 469	-124	-7,5
8	3125	-127	-10
9	1758	-130	-12,5
10	977	-133	-15
11	537	-135	-17,5
12	293	-137	-20

Sigfox

Bezdrátová komunikační technologie Sigfox se řadí mezi jednu z prvních sítí typu LPWAN. Jedná se o proprietární systém pracující v ISM pásmu využívající pro přenos dat UNB (velmi úzké pásmo – Ultra Narrow Band) o šířce 100 Hz umožňující dosažení maximální přenosové rychlosti 100 b/s. Kombinace velmi úzkého přenosového pásma a relativně nízké přenosové rychlosti zajišťuje velmi vysokou míru odolnosti vůči rušení a velké pokrytí v řádech desítek kilometrů. Efektivní využití úzkého frekvenčního pásma má za následek nízkou úroveň šumu, což umožňuje u koncových zařízení dosáhnout nízkou spotřebu energie. K přenosu signálu v vzestupném směru je použita DBPSK (rozdílové binární klíčování fázovým posuvem – Differential Binary Phase Shift Keying) modulace s vysokou spektrální účinností. Při

komunikaci v sestupném směru je využívána GFSK modulace. Při přenosu rychlostí 1 b/s je využito frekvenční pásmo o šířce jen 1 Hz, díky tomu je dosaženo vysoké citlivosti přijímače, která se mění podle přenosové rychlosti. Při maximální přenosové rychlosti 100 b/s je citlivost přijímače v vzestupném směru -142 dBm, v sestupném směru -126 dBm. Maximální vysílací výkon zařízení je pro vzestupný směr 14 dBm, v sestupném směru 27 dBm. Šířka pásma v sestupném směru je 600 Hz a maximální přenosová rychlost 600 b/s. Hlavním rysem sítě Sigfox je přenos malých zpráv jejichž denní počet je omezen na 140 odeslaných zpráv o velikosti 12 bajtů a 4 potvrzovací zprávy o velikosti 8 bajtů. Maximální ztráty spojení pro vzestupný směr jsou 161 dB, pro sestupný směr jsou stanoveny na 158 dB [19].

1.4.4 LTE

LTE (Long Term Evolution) je další stupeň ve vývoji technologie UMTS (univerzální mobilní komunikační systém – Universal Mobile Telecommunications System). Jako nástupce UMTS může teoretická přenosová rychlost dat pro sestupný směr přesáhnout 100 Mbit/s, pro vzestupný směr dosahuje maximálně 50 Mbit/s. Při komunikaci v sestupném směru se využívá vícenásobná přístupová metoda OFDMA společně se čtyřmi druhy modulace, QPSK, 16QAM, 64QAM a 256QAM. Vzestupný směr využívá přístup SC-FDMA (frekvenčně dělený vícenásobný přístup s jednou nosnou – Single Carrier Frequency Division Multiple Access), který je předkódovanou variantou OFDM s využitím modulace QPSK, 16QAM a 64QAM. Maximální ztráty spojení jsou 142,7 dB. Maximální vysílací výkon je stanoven na 23 dBm [22].

1.4.5 GSM

Je první a v současnosti nejpoužívanější digitální buňkový systém pro mobilní komunikaci. V první fázi provozu využíval systém GSM frekvenci 900 MHz, s počtem 2×124 kanálů a šířkou pásma 2×25 MHz. Později však z důvodů rostoucího provozu a potřeby obsloužit více uživatelů, došlo k využití frekvencí 1800 a 1900 MHz, což vedlo ke zvýšení počtu kanálů na 2×374 respektive 2×298 se shodnou šířkou pásma 2×75 MHz. Systém používá přístupovou metodu TDMA (časově dělený vícenásobný přístup – Time Division Multiple Access), k přenosu signálu je použita GMSK (Gaussianova modulace s minimálním zdvihem – Gaussian Minimum Shift Keying) modulace. Maximální vysílací výkon je stanoven na 39 dBm. Maximální ztráty spojení jsou 139,4 dBm. Standard GSM byl navrhnut zejména pro přenos hlasu, avšak i ten je přenášen v digitální podobě, což usnadňuje přenos dat namísto hlasu. Základní přenosová rychlost rádiového kanálu GSM systému je 33,8 kbit/s, z čehož je 22,8 kbit/s vyhrazeno pro hovorový kanál, ze zbývajících 11 kbit/s je možné pro přenos dat využít jen 9,6 kbit/s. Tento způsob přenosu dat je založen na

principu CSD (vysokorychlostní přenos dat spojováním okruhů – Circuit Switched Data).

HSCSD

Maximální dostupná přenosová rychlost v jednom časovém slotu technologie GSM je 9,6 kbit/s, případně 14,4 kbit/s při omezení počtu režijních bitů. Mechanismus přenosu dat HSCSD (vysokorychlostní přenos dat spojováním okruhů – High Speed Circuit Switched Data) umožnil navýšit maximální přenosovou rychlost spojováním časových slotů až na teoretických 115,2 kbit/s.

GPRS

Tato technologie přenosu dat je založena oproti předchozím na komutaci paketů, což vyžaduje rozšíření infrastruktury sítě a proto je často označována jako technologie 2,5 generace. GPRS zavádí čtyři třídy označené CS-1 až CS-4 určující maximální přenosovou rychlost v závislosti na kvalitě přijímaného signálu. Maximální rychlost GPRS je definována teoretickým využitím všech 8 časových slotů a použitím kódového schématu CS-4, což je $8 \times 21,4 \text{ kbit/s} = 171,2 \text{ kbit/s}$ [19].

EDGE

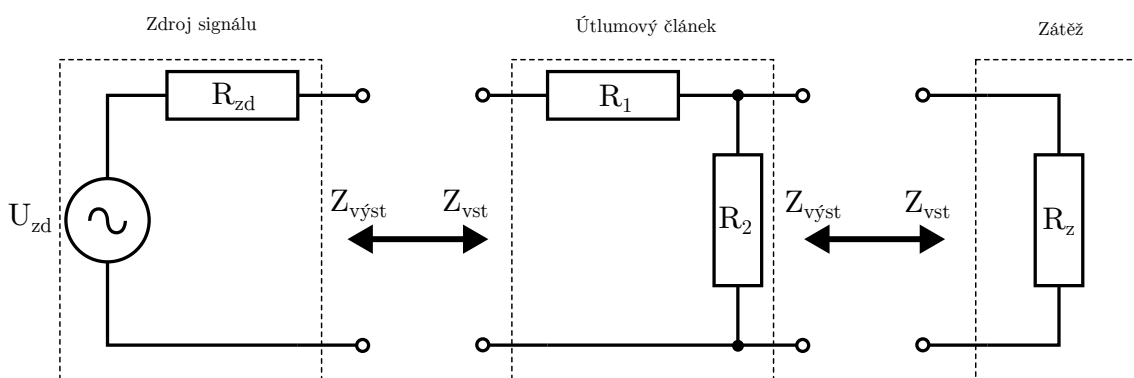
Je poslední a nejrychlejší technologií přenosu dat před příchodem sítí třetí generace. Navýšení přenosové rychlosti umožňuje změna typu modulace z původní 2stavové GMSK na 8-PSK modulaci. Díky tomu je bitová rychlost třikrát vyšší a umožňuje dosažení maximální teoretické rychlosti přenosu dat až 473,6 kbit/s [21].

Tab. 1.4: Přehled vlastností uvedených WAN technologií.

		Maximální vysílací výkon [dBm]	Duty cycle [%]	Maximální ztráty spojení	Citlivost přijímače [dBm]	Modulace	Přístupová metoda	Přenosová rychlost
Wi-Fi 802.11ax	UP	24	—	143	-82	1024QAM	OFDMA	10,53 Gbit/s
	DL	24						
Bluetooth 2 EDR	UP	20	—	90	-70	$\pi/4$ -DQPSK 8-DPSK	TDMA	3 Mbit/s
	DL	20						
NB IoT release 13	UP	23	—	164	-141	$\pi/2$ BPSK, $\pi/4$ QPSK QPSK	SC-FDMA OFDMA	22,3 kbit/s 67,8 kbit/s
	DL	37						
LTE-M release 13	UP	20	—	160,7 160,7	-129	QPSK, 16QAM	SC-FDMA OFDMA	1 Mbit/s
	DL	20						
LoRaWaN	UP	14	0,1, 1, 10	154 152	-137	CSS	— TDMA	5,34 kbit/s
	DL	16						
Sigfox	UP	14	omezen počet zpráv	158 161	-142 -126	DBPSK GFSK	—	0,1 kbit
	DL	27						
LTE	UP	23	—	142,7	-103	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM QPSK, 16QAM, 64QAM	SC-FDMA OFDMA	50 Mbit/s 100 Mbit/s
	DL	23						
GSM	UP	39	—	139,4	-104	GMSK	FDMA, TDMA	9,6 kbit/s
	DL							
HSCSD	UP DL	39	—	139,4	-104	GMSK	FDMA, TDMA	115,2 kbit/s
GPRS	UP	33	—	144 152	-104	GMSK	TDMA	171,2 kbit/s
	DL	37						
EDGE	UP DL	37	—	144	-104	GMSK, 8-PSK	FDMA, TDMA	473,6 kbit/s

2 Pasivní útlumový článek

Útlumový článek (atenuátor) je pasivní odporový prvek, jehož úkolem je snížit úroveň vstupního signálu v komunikačním řetězci na přijatelnou mez. Vzhledem k tomu, že je realizován pouze z pasivních prvků, utlumený signál není ovlivněn zkreslením nebo fázovým posunem. Atenuátor omezuje množství energie dodané do zátěže. Velikost omezené energie může být podle typu článku pevná nebo nastavitelná. Útlumové články se zapojují mezi zdroj signálu a zátěž viz obrázek 2.1 a jsou používány například pro zvýšení dynamického rozsahu měřících přístrojů, zajištění impedančního přizpůsobení oscilátorů a zesilovačů nebo pro zajištění izolace zdroje od zátěže [29].



Obr. 2.1: Schéma zapojení útlumového článku [15].

2.1 Základní parametry útlumových článků

Útlum je základní charakteristika radio-frekvenčních atenuátorů. Je definován poměrem výstupní a vstupní úrovně signálu. V případě, že je hodnota vstupního napětí 1 V a hodnota výstupního napětí 1 mV, potom se hodnota útlumu rovná 1 mV/1 V, což odpovídá tisíce násobnému snížení úrovně signálu. V praxi se však častěji využívá vyjádření útlumu v decibelech (dB), který je dle definice roven logaritmickému poměru výstupního a vstupního napětí:

$$dB_U = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_{výst}}{U_{vst}}, \quad (2.1)$$

kde dB_U je útlum, $U_{výst}$ je výstupní napětí a U_{vst} je vstupní napětí.

Charakteristická impedance označovaná také jako vlnová impedance je jedna ze základních vlastností útlumových článků. Lze ji definovat jako poměr vzájemně kolmých příčných složek magnetického a elektrického pole nekonečně dlouhého vedení.

Vlnová impedance a konstanta šíření jsou komplexní veličiny, které jsou označovány jako sekundární parametry vedení. Vyjádření vlnové impedance je:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}, \quad (2.2)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance, R_0 je měrný odpor, L_0 je měrná indukčnost, G_0 je svod a C_0 je měrná kapacita.

Při impedančním přizpůsobení obvodu dochází k maximálnímu přenosu energie směrem od zdroje k zátěži. Při tomto stavu jsou imaginární složky impedancí zdroje a zátěže komplexně sdruženy, díky čemuž nedochází ke vzniku stojatého vlnění. V takovém případě vzniká ve vedení jen postupná přímá vlna a je dosaženo maximální účinnosti přenosu. Případě nedodržení impedančního přizpůsobení odvodu dochází ke vzniku stojatých vln, které mohou poškodit například tranzistory nebo vysoko-frekvenční zesilovače [28, 29].

Nejčastější používaná hodnota impedance je 50Ω . Často se požaduje i hodnota 75Ω , ostatní velikosti impedance jsou používané velmi zřídka.

Frekvenční odezva, se změnou frekvence dochází ke změně hodnoty útlumu, což je způsobeno frekvenční závislostí použitých rezistorů, ostatních prvků útlumového článku, případně přítomností frekvenční vazby mezi vstupem a výstupem.

2.2 Základní rozdělení útlumových článků

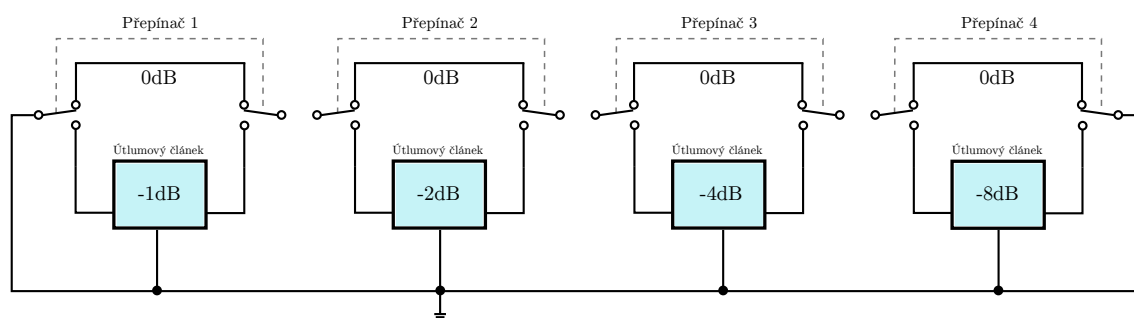
Útlumové články dělíme do následujících skupin podle jejich provedení a hodnoty útlumu.

2.2.1 Pevný atenuátor

Tento typ útlumového článku má specifickou neměnnou hodnotu útlumu, která je definována hodnotou odporu jeho prvků. Nejčastěji bývají dostupné s konektory ve formě SMA (menší miniatura verze A – SubMiniature version A) a jsou určeny pro okamžité a přímé zapojení do obvodu. Nejčastěji se používají pro impedanční přizpůsobení obvodu [29].

2.2.2 Přepínatelný krokový attenuátor

Přepínatelné attenuátory umožňují mechanicky nebo elektronicky regulovat hodnotu útlumu. Obecně jsou to nastavitelné odporové sítě s definovanou změnou útlumu pro každý přepínatelný krok. Existují dvě základní skupiny přepínatelných útlumových článků, útlumové přepínače a attenuátory se spínanými prvky. Konstrukčně se jedná o několik jednotlivých útlumových článků, které jsou kaskádovitě spojeny v sérii. Tímto způsobem řazení lze dosáhnout vysoké hodnoty celkového útlumu. Zpravidla má každý článek dvojnásobný útlum než předchozí, což umožní připojováním zvolených členů nastavit požadovanou hodnotu. Připojení jednotlivých členů zajišťují otočné, kolébkové nebo tlačítkové přepínače, viz obrázek 2.2 [29].



Obr. 2.2: Schéma zapojení přepínatelného útlumového článku [15].

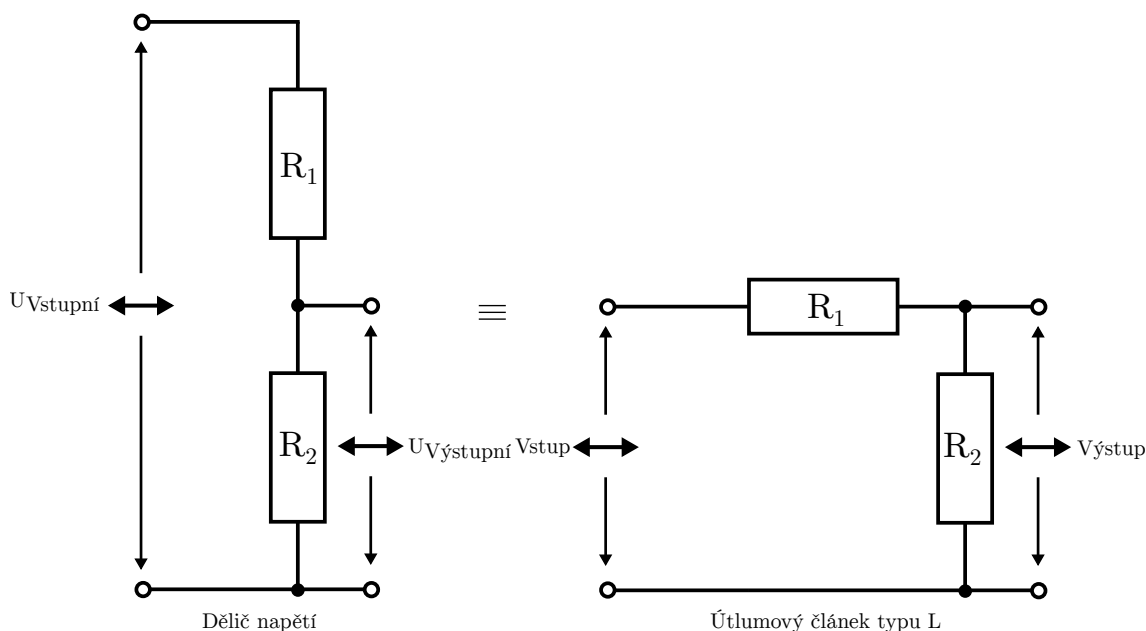
2.2.3 Proměnný attenuátor

Složitější typ attenuátorů, který se používá v aplikacích, kde je nezbytné průběžně měnit úroveň signálu. Obecně existují dva typy provedení proměnných attenuátorů. První typ umožňuje nastavení hodnoty útlumu mechanicky pomocí otočného ovladače nebo knoflíku. Tato varianta však není vzhledem k nutnosti mechanického seřízení vhodná pro systémová řešení. Druhý typem jsou elektronické attenuátory, které jsou pro nasazení v testovacích a laboratorních aplikacích vhodnější. Ovládacím prvkem elektronických útlumových článků je PIN (pozitivní intrinzická negativní – Positive Intrinsic Negative) dioda, případně FET (tranzistor řízený elektrickým polem – Field Effect Transistor) tranzistor, kde se k nastavení úrovně útlumu využívá analogové řídicí napětí [29].

2.2.4 Útlumový článek typu L

Schéma zapojení základního útlumového článku typu L vychází ze zapojení běžného děliče napětí viz obrázek 2.3. Je tvořen dvěma rezistory zapojenými v sérii napříč vstupním napětím, zatímco výstupní napětí je odebráno přes rezistor R_2 , přičemž

zapojení dvou rezistorů tvoří tvar obráceného L odkud pramení označení pro tento typ článku.



Obr. 2.3: Schéma zapojení útlumového článku typu L [16].

Útlum tohoto typu atenuátoru je definován poměrem výstupního a vstupního napětí. Vstupní rezistor R_1 je v sérii s výstupem zatímco rezistor R_2 je paralelně k výstupu respektive zátěži. Výstupní napětí je děleno faktorem odpovídající poměru velikosti odporů obou rezistorů.

$$U_{výst} = U_{vst} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right), \quad (2.3)$$

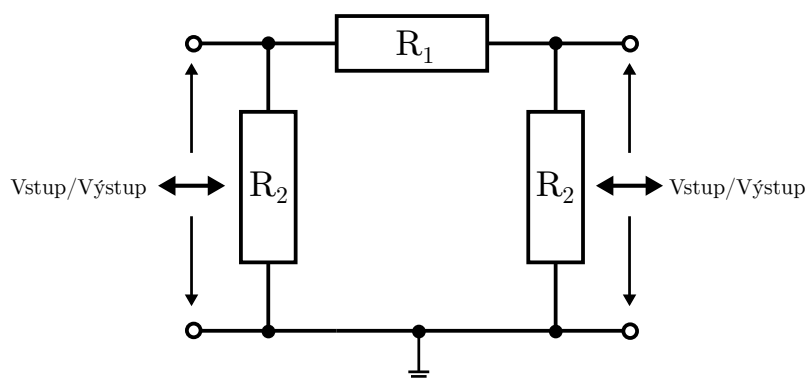
kde $U_{výst}$ je výstupní napětí, U_{vst} je vstupní napětí, R_2 odpor rezistoru a R_1 odpor rezistoru.

Jelikož je článek tvořen pouze čistě odporovými prvky, utlumený signál není ovlivněn jakoukoli změnou fáze. Připojením atenuátoru mezi zdroj a zátěž nedochází ke změně napájecího napětí zdroje, stejně jako impedance zdroje. Z tohoto důvodu lze útlumový článek typu L použít pro impedanční přizpůsobení pouze v jednom směru [14].

2.2.5 Útlumový článek typu π

Označení tohoto typu atenuátoru vychází ze schématu zapojení, které je tvořeno celkově třemi rezistory, z nichž dva jsou zapojeny paralelně a mezi nimi je třetí

rezistor v sérii viz obrázek 2.4.



Obr. 2.4: Schéma zapojení útlumového článku typu π [18].

Tento typ útlumového článku je plně symetrický a má čistě odporový charakter, čímž je zajištěna jeho linearita. Díky tomu se používá pro snížení úrovně signálu v obvodech, kde je vložen mezi dvě stejně veliké impedance. Obecně je v takovém případě hodnota velikosti odporu obou rezistorů R_2 stejná a lze ji vypočítat dle rovnice 2.4. Ovšem pokud je článek navržen pro obvody s různou impedancí, hodnota rezistorů se liší [14].

$$R_2 = Z_0 \left(\frac{N + 1}{N - 1} \right), \quad (2.4)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance a N je napěťový poměr.

Hodnota velikosti odporu rezistoru R_1 je dána vztahem:

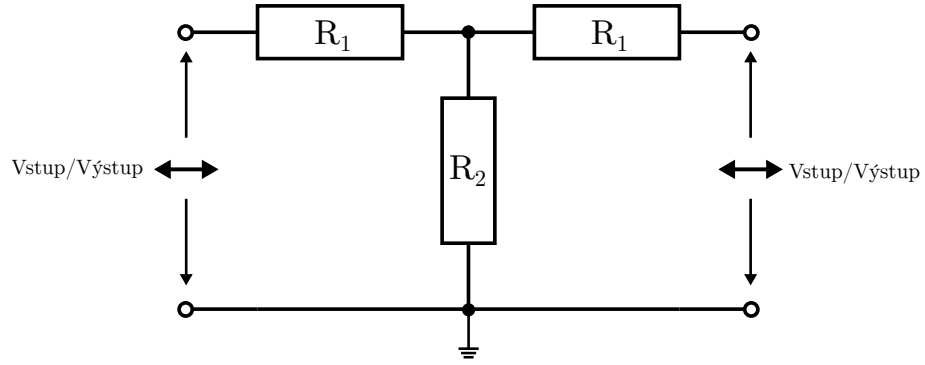
$$R_1 = Z_0 \left(\frac{N^2 - 1}{2N} \right), \quad (2.5)$$

kde Z_0 je charakteristická impedance a N je napěťový poměr [14].

2.2.6 Útlumový článek typu T

Atenuátor typu T je symetrický útlumový člen tvořen dvěma rezistory v sérii mezi nimiž je paralelní rezistor viz obrázek 2.5. Typické použití je utlumení signálu mezi obvody se stejnou impedancí nebo pro impedanceční přizpůsobení obvodů s rozdílnou impedancí [14, 29].

Pro výpočet hodnot velikostí odporů obou rezistoru je nezbytný poměr vstupního a výstupního napětí:



Obr. 2.5: Schéma zapojení útlumového článku typu T [17].

$$N = \frac{U_{vst}}{U_{výst}}, \quad (2.6)$$

kde N je napěťový poměr, U_{vst} je vstupní napětí a $U_{výst}$ je výstupní napětí.

Velikost odporů rezistorů R_1 a R_2 je určena vztahy:

$$R_1 = Z_0 \left(\frac{N - 1}{N + 1} \right), \quad (2.7)$$

$$R_2 = Z_0 \left(\frac{2N}{N^2 - 1} \right), \quad (2.8)$$

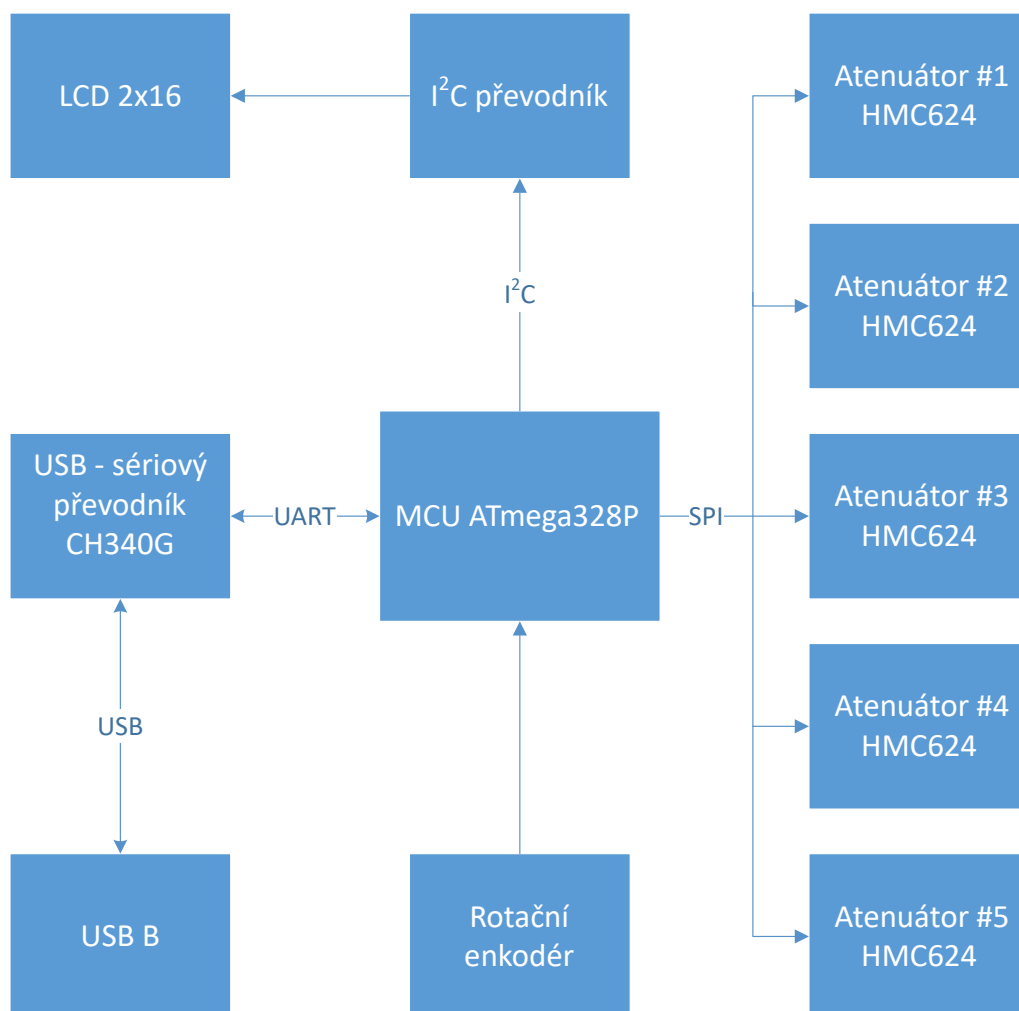
kde Z_0 je charakteristická impedance a N je napěťový poměr [29].

3 Použitý hardware

Tato kapitola je zaměřena na popis hardwaru použitého při realizaci programovatelného útlumového členu s maximálním útlumem 157,5 dB. Základem zařízení je navržená čtyřvrstvá DPS (deska plošného spoje) společně s atenuátory HMC624ALP4E od společnosti Analog Devices, které jsou ovládány pomocí mikrokontroléru ATmega328P-PU od společnosti Atmel.

3.1 Popis zařízení

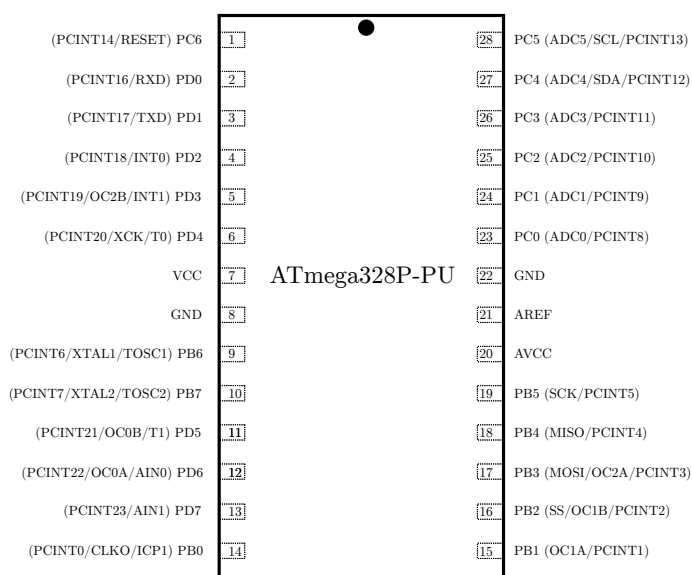
Vytvořené zařízení je určeno pro použití při testování limitů LPWAN technologií. Díky programově plynule nastavitelnému útlumu v rozmezí 0 až 157,5 dB s krokem 0,5 je vhodné i pro automatizované měření. Blokové schéma zařízení je zobrazeno na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Blokové schéma programovatelného útlumového členu.

3.2 Mikrokontrolér ATmega328P–PU

Hlavními kritérii pro výběr vhodného mikrokontroléru, pomocí kterého bude možné programově ovládat 5 digitálních atenuátorů, byly dostatečný počet univerzálních vstupně–výstupních pinů a nízká pořizovací cena. Tomu nejlépe vyhověl 8bitový mikrokontrolér ATmega328P–PU s nízkou spotřebou, založený na AVR RISC (Reduced Instruction Set Computer) architektuře. Z důvodu případné snadné výměny byla zvolena varianta s pouzdem PDIP (plastové dvouřadé pouzdro – Plastic Dual Inline Package), které má 28 vývodů a je umístěno do precizní patice. Rozložení pinů je zobrazeno na obrázku 3.2.

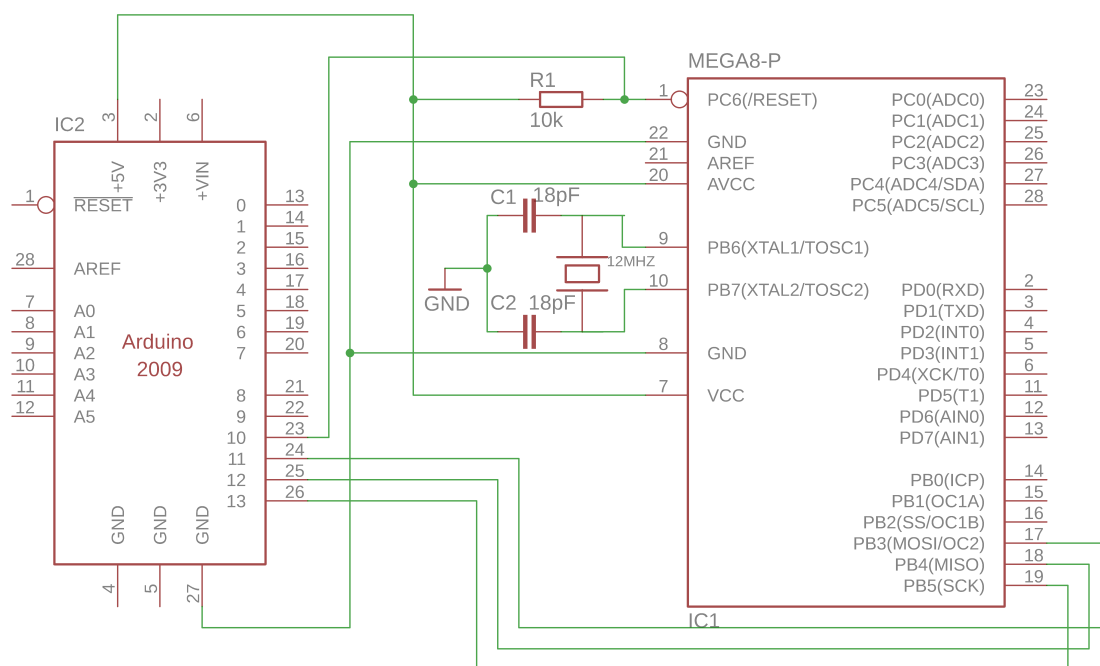


Obr. 3.2: Rozložení vývodů mikrokontroléru ATmega328P–PU [31].

3.2.1 Zavaděč (Bootloader)

Použitý mikrokontrolér z výroby neobsahuje bootloader, česky zavaděč, což je aplikace, která umožňuje nahrání programu do Flash paměti čipu přes jeho sériové rozhraní. Díky vypálení zavaděče je možné mikrokontrolér možné programovat stejným způsobem, jako při použití běžně dostupné platformy Arduino UNO a programovacího prostředí Arduino IDE (integrované vývojové prostředí – Integrated Development Environment). Zavaděč implementuje komunikační protokol STK500, který umožňuje programování mikrokontroléru AVR. Po přivedení napájecího napětí se okamžitě začne vykonávat kód zavaděče, který je uložen na konci Flash paměti. Podle katalogového listu mikrokontroléru ATmega328P–PU zaručuje čip bezproblémový chod pro napájecí napětí o velikosti 3,3 V do frekvence 12,7 MHz. Z tohoto

důvodu nebylo možné použít běžný zavaděč, který je určen pro obvody mikrokontroléru společně s 16 MHz krystalem. Mikrokontrolér byl zapojen s 12 MHz krystalem se zavaděčem s parametry pro čip pracující na maximální frekvenci 12 MHz. Pro nahrání zavaděče byla použita vývojová deska Arduino UNO R3, která slouží jako programátor. Mikrokontrolér ATmega328P–PU byl zapojen na nepájivém poli společně s krystalem, 10 k Ω rezistorem a dvěma kondenzátory s kapacitou 18 pF. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Schéma zapojení pro vypálení zavaděče

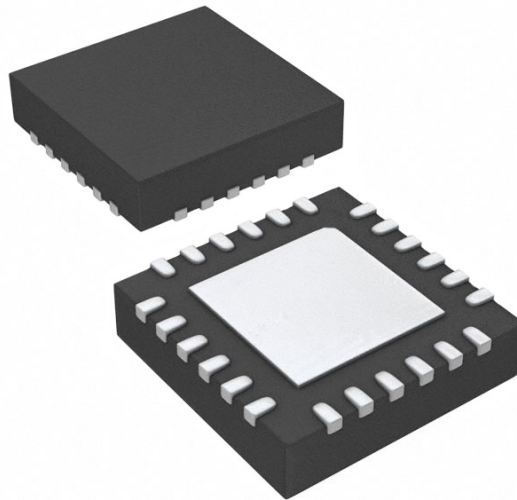
3.3 Digitální atenuátor

Integrovaný obvod HMC624ALP4E je širokopásmový 6bitový digitální útlumový člen s maximálním nastavitelným útlumem 31,5 dB v nastavitelném kroku 0,5 dB. Integrovaný obvod je rozdělen na dvě základní části, první ovládací část je tvořena komunikačním rozhraním s podporou CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) a TTL (tranzistorově–tranzistorová logika – Transistor–Transistor Logic) napěťových úrovní. Rozhraní umožňuje sériový nebo paralelní způsob komunikace. Druhou část tvoří polovodičový atenuátor z arsenidu gália s rozsahem pracovní frekvence od 0,1 GHz do 6 GHz. Obvod je realizován v pouzdru SMD (součástka pro povrchovou montáž – Surface Mount Device) s označením QFN (Quad Flat No-leads), které se vyznačuje malými rozměry a absencí vývodů, které jsou

Tab. 3.1: Pravdivostní tabulka digitálních vstupů.

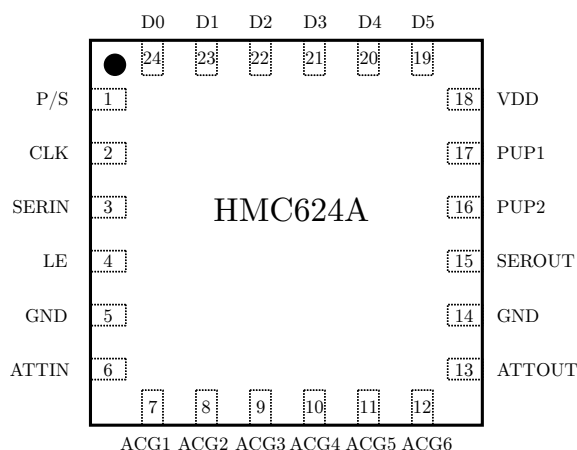
D0	D1	D2	D3	D4	D5	Útlum [dB]
1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	1	1	0,5
1	0	1	1	1	1	1,0
1	1	0	1	1	1	2,0
1	1	1	0	1	1	4,0
1	1	1	1	0	1	8,0
1	1	1	1	1	0	16,0
0	0	0	0	0	0	31,5

nahrazeny kontaktními ploškami, viz obrázek 3.4. Pouzdro čipu atenuátoru má rozměry 4x4 mm a obsahuje 24 kontaktních plošek. K napájení atenuátoru lze použít stejnosměrné napětí v rozmezí 3–5,6 V přivedené na kontakt VDD [32].



Obr. 3.4: Pouzdro QFN24 pro SMD montáž [30].

Pro nastavení velikosti útlumu atenuátoru slouží šest digitálních vstupů s označením D0 až D5, viz obrázek 3.5. Přivedením logické jedničky nebo logické nuly na tyto piny určuje jaký celkový útlum bude pro obvod útlumového členu nastaven. Kombinací nastavení digitálních vstupů lze dosáhnout jakéhokoli hodnoty útlumu v rozsahu 0 až 31,5 dB s krokem 0,5 dB, viz tabulka 3.1 [32].



Obr. 3.5: Rozložení vývodů atenuátoru HMC624A [31].

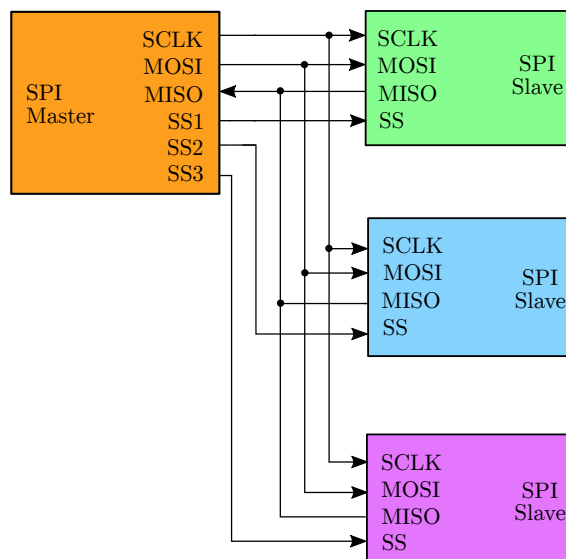
3.3.1 Komunikační rozhraní

Integrovaný obvod HMC624A může být ovládán přes sériové nebo paralelní rozhraní. Pro výběr odpovídajícího způsobu komunikace slouží kontakt s označením P/S, viz obrázek 3.5. V případě přivedení logické jedničky je vybrána sériová komunikace, v opačném případě je pro komunikaci zvolen paralelní přenos [32].

Sériová komunikace

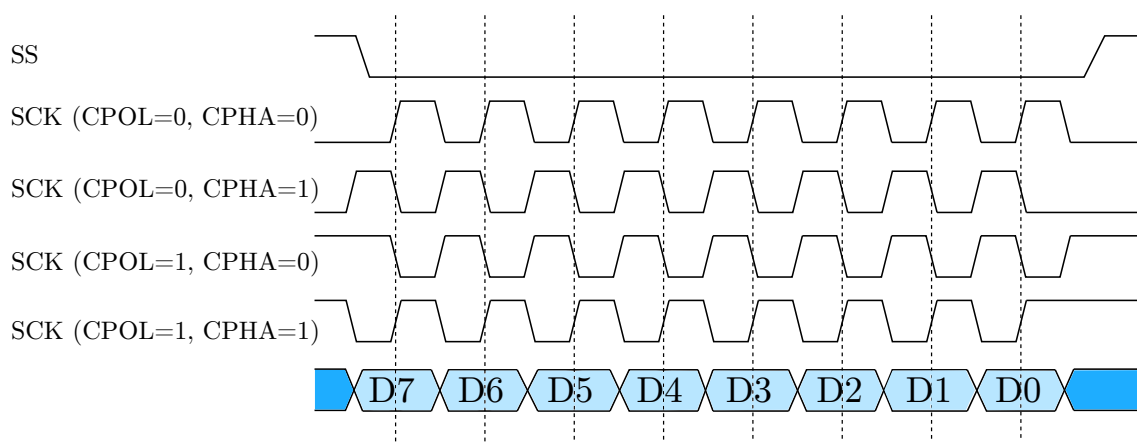
Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem ATmega328P-PU a jednotlivými atenuátory je použito SPI (sériové periferní rozhraní – Serial Peripheral Interface) rozhraní. Základní princip komunikace je zobrazen na obrázku 3.6. V komunikačním řetězci mohou být zapojena dvě a více zařízení. Jedno zařízení zpravidla mikrokontrolér, je typu Master, ostatní zařízení jsou typu Slave. Propojení je realizováno čtyřmi vodiči s označením SCLK (Serial Clock), MOSI (Master Out Slave In), MISO (Master In Slave Out) a SS (Slave Select). Na výstupu SCLK Master zařízení je generován hodinový signál, který je přiveden na vstup SCLK všech Slave zařízení. Výstup MOSI z Master zařízení je připojen na datový výstup MOSI všech Slave zařízení. V případě duplexního přenosu dat, je pro přenos ve směru od Slave zařízení do Master zařízení, využit datový výstup MISO u zařízení Slave, který je připojen na datový vstup MISO Master zařízení. Komunikace přes SPI rozhraní může probíhat pouze mezi zařízením Master a některým ze Slave zařízení. Pro výběr konkrétního zařízení, se kterým bude Master komunikovat, slouží vstup SS na Slave zařízení. Přivedení logické nuly na vstup SS daného Slave obvodu dochází k výběru daného Slave obvodu, který je následně připraven přijímat data od Master zařízení. Přivedení logické jedničky na vstup SS, umožňuje přenos dat ze Slave zařízení do Master zařízení.

SPI rozhraní atenuátoru je tvořeno třemi kontakty s označením LE, SERIN a



Obr. 3.6: Princip komunikace mezi Master a Slave [33].

CLK. Pokud je na pin LE přivedena logická jednička nastavení útlumu je řízeno vstupy D0–D5 podle tabulky 3.1. Pro vstup sériových dat je určen pin s označením SERIN. CLK slouží pro přivedení hodinového signálu. V režimu sériové komunikace je MSB (nejvýznamnější bit – Most Significant Bit) vstupních dat synchronizována na náběžnou hranu hodinového impulsu přivedeno na CLK [32]. Komunikace přes SPI rozhraní může probíhat ve čtyřech různých režimech. Zvolený režim specifikuje polaritu CPOL (polarita hodinového signálu – Clock Polarity) a fázi CPHA (fáze hodinového signálu – Clock Phase) hodinového signálu viz obrázek 3.7.



Obr. 3.7: Přehled režimů SPI rozhraní [37].

Paralelní komunikace

Paralelní mód komunikace je aktivní pokud je pin P/S nastaven na logickou nulu. Integrovaný obvod umožňuje dva režimy paralelní komunikace. Přímý paralelní režim umožňuje nastavovat hodnotu útlumu přímo vstupy D0–D5 za podmínky přítomnosti logické jedničky na pinu LE.

Blokovaný paralelní režim umožňuje řízení útlumu podle vstupů řídicího napětí vstupů D0–D5, jež se nastavuje při přítomnosti logické nuly na pinu LE. Ke změně hodnoty útlumu dojde však pouze v případě, kdy je na pin LE přiveden impuls logické jedničky s minimální délkou trvání 10 ms [32].

3.4 LCD displej JHD162A

Pro zobrazení uživatelského menu byl použit modře podsvícený LCD (Displej z tekutých krystalů – Liquid Crystal Display) s označením JHD162A, který umožňuje zobrazit 20 znaků ve čtyřech řadách viz obrázek 3.9. Displej využívá řadič HD44780 od společnosti Hitachi. Displej má 16 vývodů, viz tabulka 3.2, a může pracovat ve 4bitovém nebo 8bitovém režimu. Z důvodu úspory použitých datových pinů mikrokontroléru ATmega328P při zapojení displeje, byl použit I²C (vnitřní integrovaný obvod – Inter-Integrated Circuit) převodník, který využívá pro přenos dat I²C sběrnici s použitím pouze 4 vodičů, z nichž dva jsou určeny pro přivedení napájecího napětí 5V a GND. Zbývající dva vodiče s označením SDA (Synchronous Data) a SCL (Synchronous Clock) jsou použity pro I²C sběrnici.

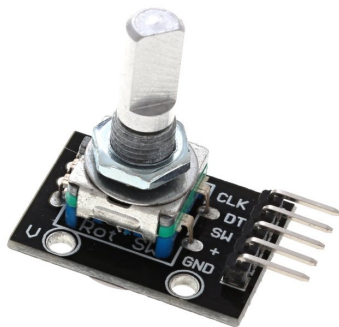
Tab. 3.2: Tabulka zapojení pinů LCD [35].

Číslo pinu	Symbol	Popis
1	V_{SS}, GND	GND napájení displeje
2	V_{DD}, V_{CC}	+5 V napájení displeje
3	V_0	Nastavení kontrastu
4–6	RS, R/W, E	Řízení řadiče
7–14	DB0–DB7	Datové piny
15	LED+	Anoda podsvícení
16	LED–	Katoda podsvícení

3.5 Rotační enkodér KY–040

Jako ovládací prvek celého zařízení byl zvolen rotační enkodér s tlačítkem, který ve spojení s displejem z tekutých krystalů umožňuje rychlé a snadné nastavení požado-

vané hodnoty útlumu. Enkodér disponuje tlačítkem, které se aktivuje stiskem celé osy enkodéru. Modul obsahuje 5 pinů, viz obrázek 3.8, a díky závitu na hřídelce je možná jeho snadná montáž do čelního panelu krabičky zařízení pomocí fixační matice. Enkodér má rozlišení 20 pulzů na jednu otáčku a počet otáček není omezen, což umožňuje neomezené otáčení osou na obě strany. Napájecí napětí o velikost $+5\text{ V}$ je přivedeno na pin s označením $+$, zem je přivedena na pin s označením GND. Na pinech s označením CLK a DT je při otáčení osou odpovídajícím směrem generován obdélníkový signál. Na pinu s označením SW je při stisku osy enkodéru přítomna logická nula, v opačném případě logická jednička.



Obr. 3.8: Rotační enkodér KY-040 [35].



Obr. 3.9: Displej 4x20 [36].

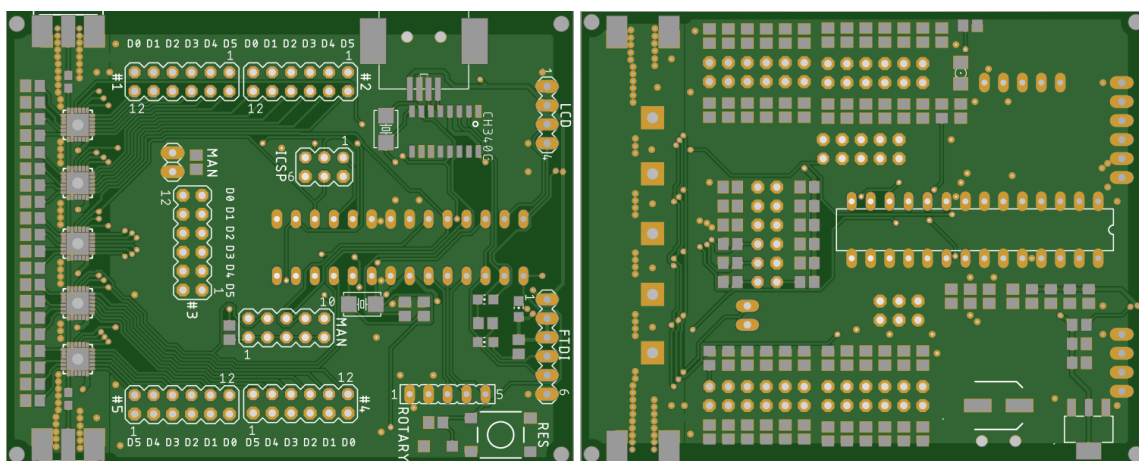
3.6 USB–serial převodník CH340G

Součástí zařízení je čip s označením CH340G, který umožňuje převod dat z USB rozhraní na sériovou linku mikrokontroléru ATmega328P-PU. Vstupní data jsou přiváděna skrze USB konektor na piny s označením D $-$ a D $+$. Napájecí napětí převodníku může být $3,3\text{ V}$ nebo 5 V . V případě, že je vybráno napětí o velikosti $3,3\text{ V}$ je nezbytné připojit na toto napětí i pin s označením V3. Pro indikaci přítomnosti napětí je doplněna zelená LED dioda v SMD pouzdru 0805. Převodník vyžaduje připojení 12 MHz krystalu na vývody XI a XO. Tyto piny jsou dále uzemněny přes oddělovací kondenzátory s kapacitou 18 pF .

3.7 Deska plošného spoje

Vzhledem k charakteru zařízení a nutnosti vést radiofrekvenční signál, který vyžaduje specifické parametry, bylo přistoupeno k návrhu a výrobě desky plošného spoje. Vizualizace DPS o rozměrech $76 \times 61 \times 1,572\text{ mm}$ ze strany součástech a ze

strany spojů je zobrazena na obrázku 3.10. Pro návrh byl použit editor plošných spojů EAGLE. Byla zvolena čtyřvrstvá deska o celkové tloušťce 1,572 mm, z čehož 1 mm tvoří střední izolační vrstva desky z materiálu s označením FR4 mezi vnitřními vrstvami 2 a 3. Tloušťka izolace mezi vrstvami 1 až 2 a 3 až 4 je shodně 0,25 mm. Tloušťka mědi je na všech vrstvách 0,018 mm. Pro správné určení parametrů vodivých cest, které povedou radiofrekvenční signál byl použit program SaturnPCB Design, který umožňuje výpočet parametrů vodivých cest, tloušťky desky plošného spoje a izolační vzdálenosti cest pro dodržení podmínky charakteristické impedance o velikosti $50\ \Omega$.



Obr. 3.10: Deska plošného spoje ze strany spojů a ze strany součástek

Pro dodržení charakteristické impedance $50\ \Omega$ byla šířka vodivých cest radiofrekvenčního signálu stanovena na 0,4 mm a výška substrátu mezi vrstvami 1 a 2 je 0,25 mm. To vše při uvažovaném mikropáskovém typu vedení. Digitální attenuátor má velký frekvenční rozsah, čím vyšší použitá frekvence, tím je obvod citlivější na šum napájecího zdroje. Z tohoto důvodu byl pro napájení attenuátoru zvolen nízkoproudý LDO (Low-Dropout) napájecí regulátor MCP1703A s pevným výstupní napětím 3,3 V a SMD pouzdrem SOT-223. Obvod regulátoru je doplněn o blokovací kondenzátory s hodnotami kapacity 0,1 a $10\ \mu\text{F}$. K signalizaci přítomnosti výstupního napětí 3,3 V slouží zelená LED dioda zapojena za výstup regulátoru společně s rezistorem R2. Maximální velikost vstupního napětí regulátoru je 16 V.

Návrh desky uvažuje i možnost nastavení útlumu jednotlivých attenuátoru zcela manuálně. K tomuto účelu jsou na desce pro každý attenuátor umístěny připojovací lišty s 6 piny ve dvou řadách. Tyto připojovací lišty umožňují ručně nastavit hodnotu útlumu jednotlivých digitálních útlumových článků v rozsahu 0–31,5 dB podle pravdivostní tabulky viz 3.1. Lišty jsou označeny popiskem ve formě znaku mřížky a čísla attenuátoru. Propojením příslušné dvojice pinů na liště dojde k přivedení napětí o velikosti 3,3 V, které je sníženo o úbytek napětí na rezistorech s hodnotou odporu

470 Ω na digitální vstupy D0–D5, kterými se nastavuje hodnota útlumu. V opačném případě jsou vstupy uzemněny přes odpory s hodnotou odporu 1 k Ω , což na vstupu reprezentuje logickou nulu. Pro aktivaci ručního režimu nastavení hodnoty útlumu je nezbytné nejprve propojit připojovací lištu s označením MAN, která uzemní piny P/S u všech digitálních attenuátorů, čímž je zajištěno přepnutí způsobu komunikace attenuátorů do paralelního režimu viz kapitola 3.3.1.

Na všech pěti pájecích ploškách pro útlumové články byli umístěny čtvercové prokovy o průměru 2,9 mm a se středovou dírou o průměru 1,5 mm, která umožňuje ruční pájení spodního kontaktu GND attenuátorů, který je nezbytný pro jeho správnou funkci a zároveň zlepšuje odvod generovaného tepla. Podél vodivé cesty určené pro radiofrekvenční signál byly implementovány prokovy za účelem zlepšení odstínění.

3.8 Vytvořené zařízení

Vytvořené zařízení umožňuje nastavení velikosti útlumu v rozsahu 0 až 157,5 dB s krokem 0,5 dB. Nastavení lze provádět ručně pomocí propojení odpovídajících pinů připojovacích lišt, které jsou umístěny na desce plošného spoje. Další možnost nastavení využívá rotační enkodér, který v kombinaci s mikrokontrolerem nastavuje hodnotu útlumu přes SPI rozhraní. Nastavená hodnota útlumu je zobrazena na displeji. Zařízení je napájeno přímo z USB rozhraní, které je využito pro přenos dat v případě vzdáleného ovládání zařízení. Pro snadné přivedení RF signálu je deska vybavena bočními SMA konektory.

3.8.1 Uživatelské menu

Po zapnutí zařízení je na displeji zobrazena úvodní obrazovka uživatelského menu, viz obrázek 3.11a, která informuje o aktuálně nastavené hodnotě útlumu. Pro případnou změnu hodnoty útlumu vyzývá menu obsluhu ke stisku ovládacího prvku zařízení.

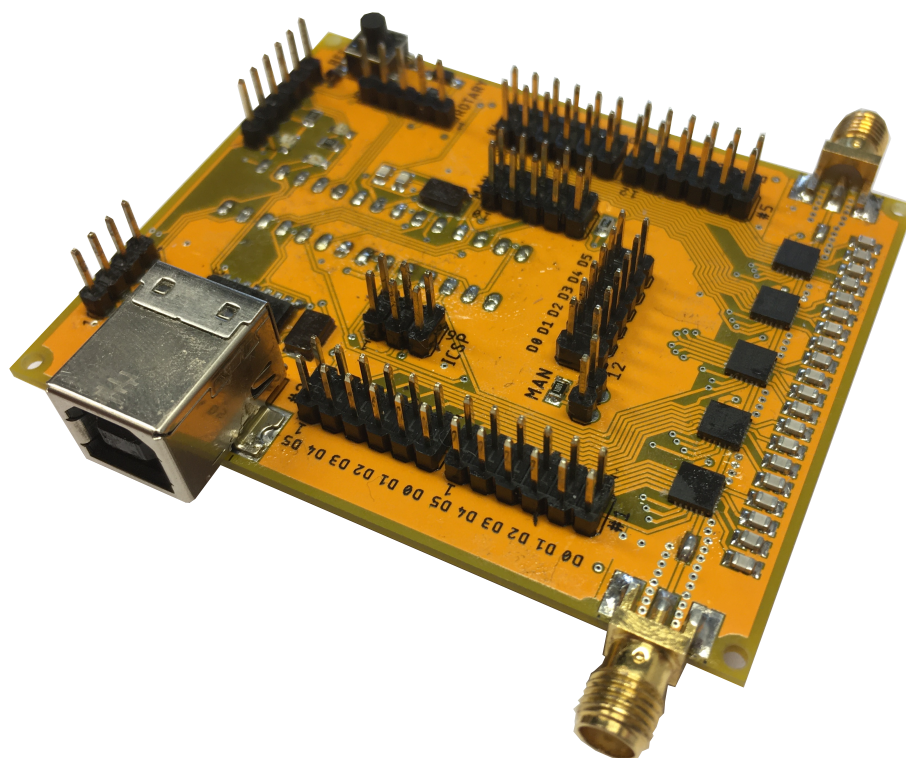


(a) První obrazovka uživatelského menu

(b) Druhá obrazovka uživatelského menu

Obr. 3.11: Obrazovky uživatelského menu

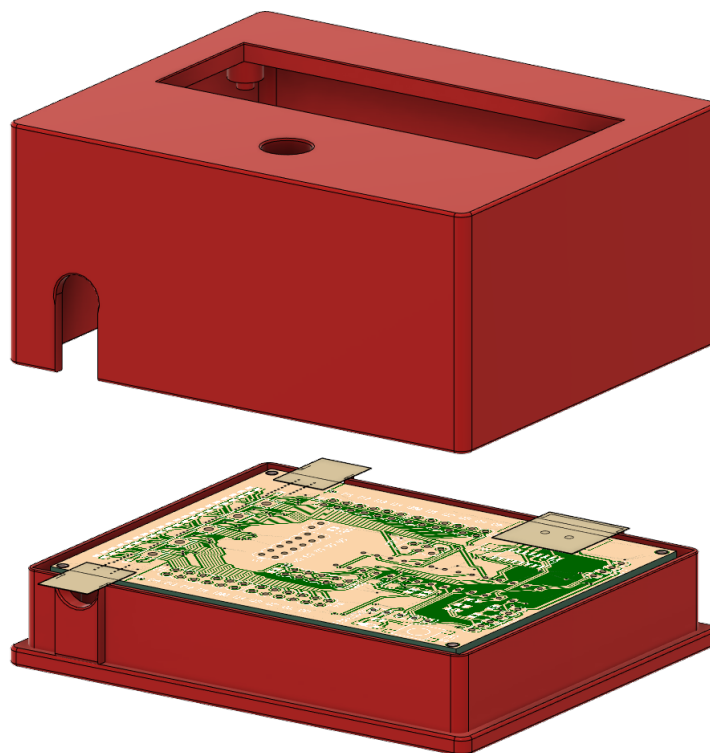
Po jeho stisknutí se na displeji zobrazí druhá úroveň uživatelského menu, viz obrázek 3.11b. V této úrovni je obsluze umožněno nastavení požadované hodnoty útlumu otáčením ovládacího prvku. Pro nastavení aktuálně zobrazené hodnoty je nezbytné stisknutí ovládacího prvku zařízení, čímž dojde k přepnutí zpět na úvodní obrazovku uživatelského menu.



Obr. 3.12: Osazená deska plošného spoje.

3.8.2 Návrh krabičky zařízení

Pro návrh zapouzdření programovatelného útlumového členu byl použit CAD/CAM (počítačová podpora modelování/počítačová podpora obrábění – Computer Aid Designing/Computer Aid Manufacturing) Fusion 360, který je vhodný pro návrh krabiček a pouzder prototypových projektů. Ve spolupráci s programem EAGLE, ve kterém byl realizován návrh desky plošného spoje, umožňuje přenesení a následnou vizualizaci navržené desky. Na základě této vizualizace byl vytvořen návrh dvoudílné krabičky pro zapouzdření DPS, displeje a ostatních komponent zařízení. Krabička byla navržena pro uzavření bez nutnosti použití šroubů, pevný spoj vzniká nasunutím horní části krytu na základnu krabičky, viz obrázek 3.13. Fyzická výroba pouzdra byla realizována pomocí 3D tisku.



Obr. 3.13: Návrh dvoudílné krabičky zařízení.

3.9 Programové vybavení

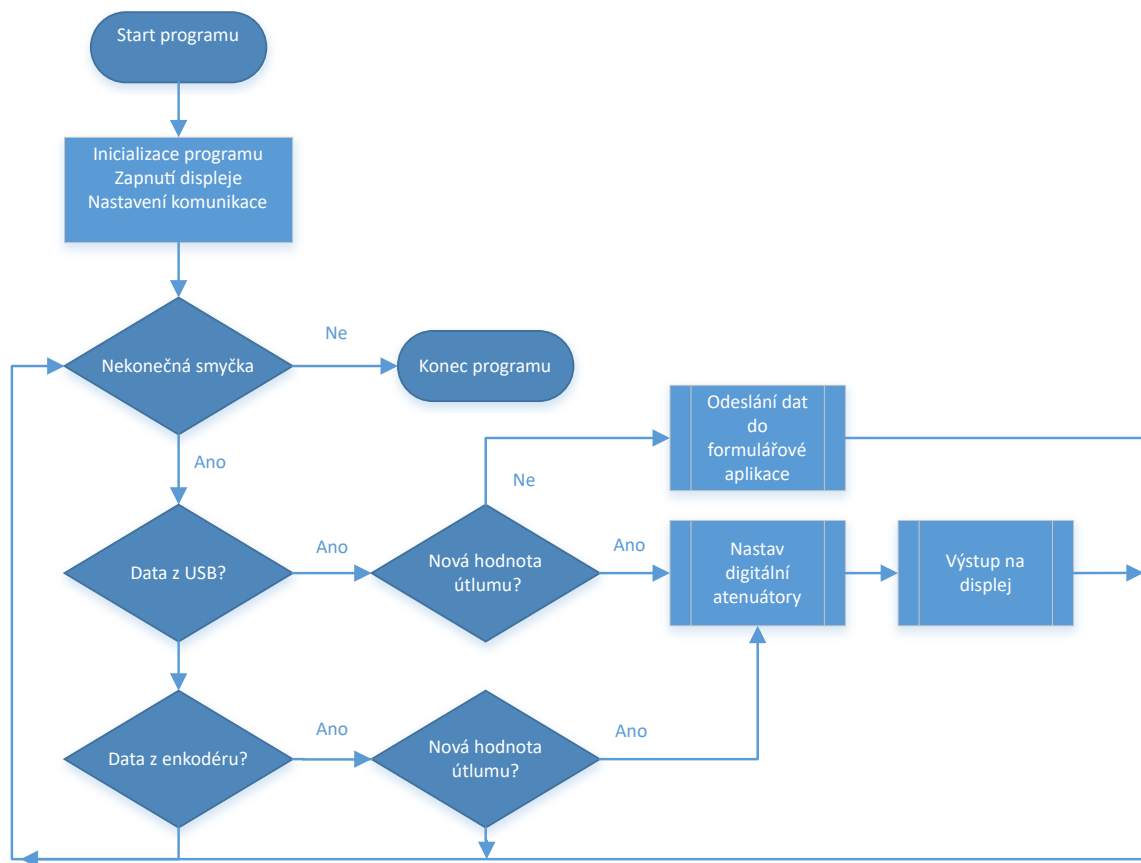
Kapitola popisuje programové vybavení zařízení, které se skládá ze zdrojového kódu řídicího mikropočítače, který zajišťuje zpracování signálů z rotačního enkodéru, zobrazení dat na displeji a odesílání dat přes SPI rozhraní do jednotlivých digitálních attenuátorů. Dále je popsána konzolová aplikace pro komunikaci se zařízením přes USB rozhraní a návrh komunikačního protokolu.

3.9.1 Zdrojový kód zařízení

Program je napsán v jazyce pro platformu Arduino, který je odvozen z programovacího jazyka Wiring. Kód byl vytvořen ve vývojovém prostředí Arduino IDE. Průběh programu je obecně zobrazen na vývojovém diagramu, viz obrázek 3.14. Princip programu je založen na nekonečné smyčce, která opakovaně kontroluje, zda došlo ke vstupu dat z rotačního enkodéru nebo USB rozhraní.

Import knihoven

Po spuštění programu dojde nejprve k importu následujících čtyř knihoven, které jsou nezbytné pro korektní funkci zařízení:



Obr. 3.14: Vývojový diagram zdrojového programu.

- `SPI.h` - knihovna umožňuje komunikaci s ostatními zařízeními pomocí SPI rozhraní. Jako master zařízení je v tomto případě považován mikrokontrolér ATmega328P-PU.
- `Encoder.h` - knihovna zajišťuje zpracování signálu z kvadrurního enkodéru, definuje funkci `Encoder enc(pin1, pin2)`.
- `Wire.h` - knihovna nezbytná při komunikaci přes sběrnici I²C, využívá piny s označením SDA a SCL.
- `LiquidCrystal_I2C.h` - knihovna zajišťuje podporu displeje s I²C převodníkem a HD44780.

Inicializace proměnných a nastavení komunikace

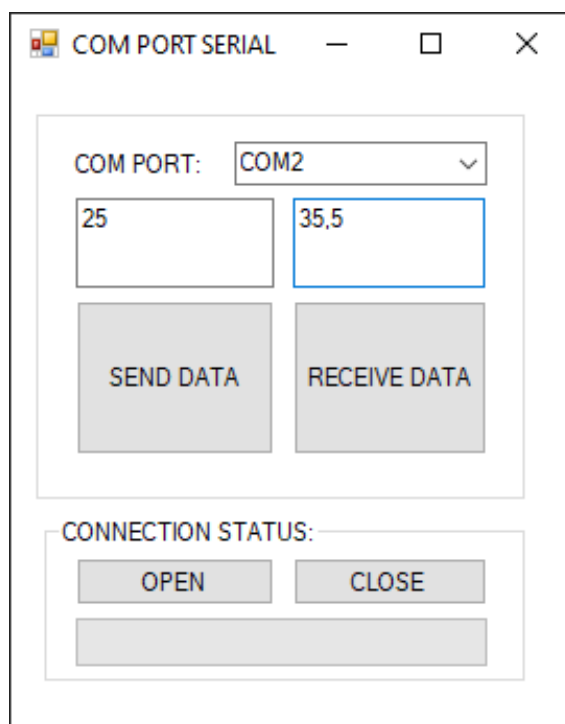
Po importu knihoven jsou dále nastaveny všechny proměnné, které jsou v programu použity. Jedná se zejména o tři proměnné pro obsluhu tlačítka a směru otáčení rotačního enkodéru, další proměnná definuje maximální dovolenou rychlost otáčení enkodérem, při které dochází k zaznamenání změny stavu. Typem pole proměnných je definováno pět GPIO (všeobecný vstup/výstup – General Purpose Input/Output) pinů mikropočítače ATmega328P-PU, které jsou použity jako výstupy pro ovládání

LE pinů jednotlivých atenuátorů. Maximální frekvence SPI rozhraní je nastavena na 20 MHz, pořadí odesílaných bitů se řídí podle MSB a je nastaven režim komunikace SPI na MODE1, viz podkapitola 3.3.1.

3.9.2 Aplikace pro vzdálenou obsluhu

Pro snadné a bezobslužné nastavení požadované hodnoty útlumu na digitálním útlumovém členu přes USB rozhraní, byla vyvinuta konzolová aplikace, která je napsána v jazyce C#. Vývoj probíhal ve frameworku Windows Forms vývojového prostředí Visual Studio. Aplikace ve spolupráci s příkazy navrženého komunikačního protokolu, viz podkapitola 3.9.3 zajišťuje inicializaci sériového rozhraní počítače a přenos uživatelských dat. Uživatel před přenosem dat musí vybrat správný komunikační port. Všechny ostatní parametry pro nastavení portu není možné uživatelsky měnit a jsou nastaveny následovně:

- Baudová rychlost: 9600 baud/s
- Datové bity: 8
- Parita: žádná
- Počet stop bitů: 1



Obr. 3.15: Vyvinutá formulářová aplikace.

3.9.3 Komunikační protokol

Pro zajištění spolehlivé komunikace mezi uživatelskou konzolovou aplikací a vytvořeným zařízením, bylo nezbytné definovat komunikační protokol, který zajistí správnou interpretaci příkazů z aplikace běžící na počítači. Protokol se skládá ze čtyř základních příkazů. Každý příkaz je tvořen čtyřmi poli, přičemž první pole obsahuje vždy znak mřížky #, poslední pole obsahuje vždy dvojici znaků \r \n. Tyto symboly umožňují rozpoznání začátku a konce příkazu na straně firmwaru vytvořeného zařízení. Druhé pole obsahuje název samotného příkazu, který je tvořen čtyřmi znaky. Třetí pole je vyplněno daty, viz obrázek 3.16. Pro zajištění inicializace a realizace komunikace přes sériové komunikační rozhraní PC jsou definovány následující příkazy:



Obr. 3.16: Formát příkazu komunikačního protokolu.

- Příkaz: STAR
Popis příkazu: Příkaz STAR zahajuje přenos dat ze strany PC do vytvořeného zařízení.
- Příkaz: STOP
Popis příkazu: Příkaz STOP ukončuje přenos dat ze strany PC do vytvořeného zařízení.
- Příkaz: SETA
Popis příkazu: Příkaz SETA nastaví zadanou hodnotu útlumu v konzolové aplikaci na digitálním útlumovém článku. Data příkazu a data hodnoty od sebe nejsou odděleny žádným znakem.
- Příkaz: GETA
Popis příkazu: Příkaz GETA vyčte aktuální nastavenou hodnotu útlumu v digitálním útlumovém článku a zobrazí ji v poli Received value.

Průběh komunikace

Pro komunikaci se využívá funkce `Serial.begin(parametr)`. Parametr (`speed`) udává požadovanou rychlost komunikace v b/s. Ostatní volitelné argumenty definují data, paritu a stop bity. V programu je použito výchozí nastavení, jelikož se shoduje s nastavením na straně konzolové aplikace.

V případě požadavku na vyčtení nastavené hodnoty útlumu z článku a její zobrazení v konzolové aplikaci je použita funkce `Serial.write(parametr)`, která zapíše binární data na sériové rozhraní mikrokontroléru ATmega328P-PU. Vzhledem k tomu, že se může posílat jen hodnota útlumu zařízení, která je v rozsahu 0–157,5 je použit parametr `str`, který definuje hodnotu k odeslání jako několik bajtů. Před samotným odesláním dat se kontroluje, zda je port otevřený voláním funkce `if(Serial)`. Datový typ funkce je `bool`, a v případě otevřeného portu vrací hodnotu `true`.

3.10 Měření útlumu digitálního útlumového členu

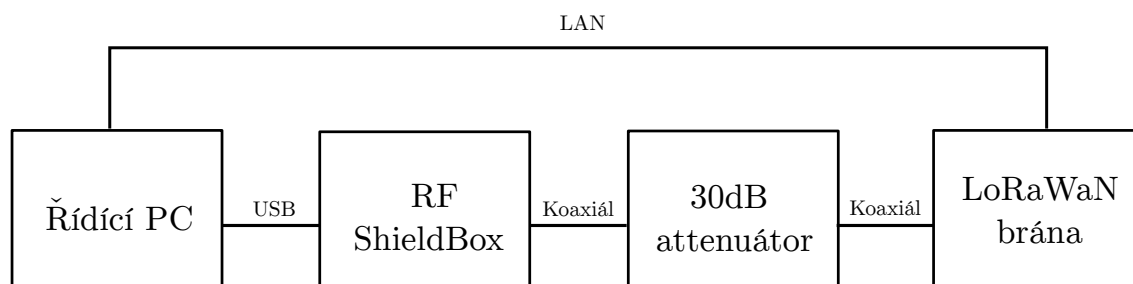
Součástí zadání práce bylo měření útlumu vytvořeného zařízení při různých frekvencích. Bohužel během oživování a testování zařízení došlo k jeho poškození. Následkem toho bylo možné provést měření útlumu pouze v rozsahu 0–31,5 dB. K měření byla využita LPWAN technologie LoRaWaN.

3.10.1 Měřicí pracoviště

Princip způsobu měření je zobrazen na blokovém schématu měřicího pracoviště, viz obrázek 3.17. Pracoviště je tvořeno LoRaWaN bránou připojenou koaxiálním kabelem ke stíněnému RF boxu. Mezi bránu a stíněný RF box byl umístěn pevný útlumový člen s hodnotou útlumu 30 dB. Ve stíněném RF boxu bylo umístěno vytvořené zařízení, ke kterému byl připojen klientský LoRa modul. Umístění obou zařízení ve stíněném boxu zajistilo eliminaci rušení z okolního prostředí. Brána LoRaWaN byla pomocí skriptu na řídicím počítači nastavena na vysílací výkon 14 dBm s využitím frekvenčního pásma 868 MHz.

3.10.2 Metodika měření

V prvním kroku byla určena referenční hodnota intenzity signálu při použití samotného LoRa modulu umístěného ve stíněném boxu a připojení pevného atenuátoru s útlumem 30 dB. Měření bylo pomocí skriptu na řídicím počítači provedeno desetkrát při nastaveném vysílacím výkonu 14 dBm. Výsledná referenční hodnota intenzity signálu je -16,2 dBm, viz tabulka 3.3. V dalším kroku bylo vytvořené zařízení umístěno



Obr. 3.17: Blokové schéma měřícího pracoviště.

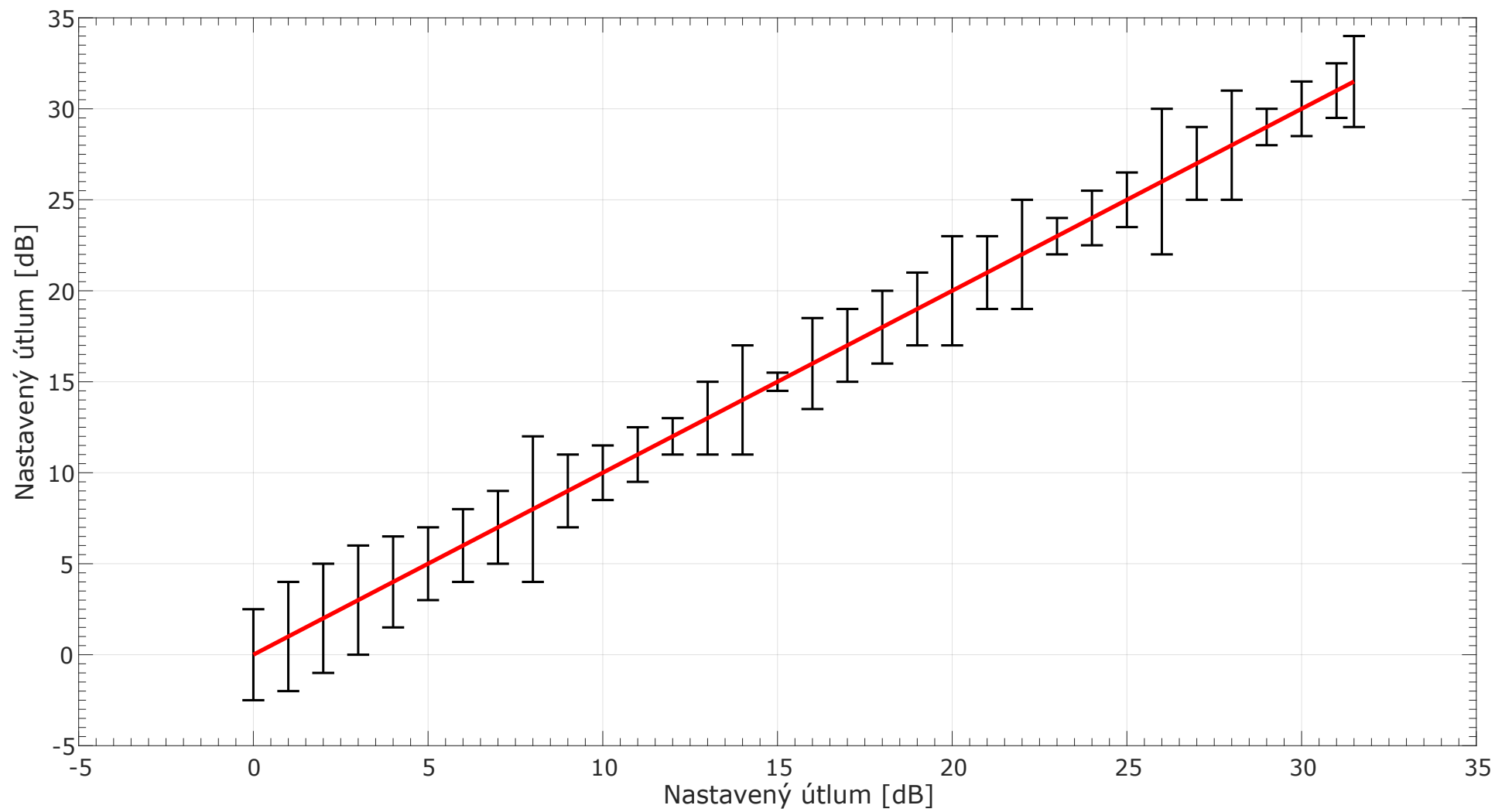
do stíněného RF boxu. Krok pro nastavení hodnoty útlumu byl stanoven na 1 dB. Pro každou hodnotu útlumu bylo provedeno desetinásobné měření intenzity signálu přijímaného LoRa modulem. Celkově bylo naměřeno 320 hodnot, viz tabulka D.1.

Tab. 3.3: Výsledky měření referenční intenzity signálu.

Počet měření:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Průměr:
RSSI [dBm] :	-13	-15	-18	-17	-15	-15	-18	-17	-15	-19	-16,2

3.10.3 Výsledky měření

Nejmenší zjištěný rozptyl o velikosti 1 dB mezi měřeními byl u hodnoty nastaveného útlumu 15 dB. Naopak nejvyšší rozptyl 8 dB mezi jednotlivými hodnotami intenzity signálu, byl při nastavené hodnotě útlumu 8 dB a 26 dB. Přehled rozptylů intenzity signálu mezi jednotlivými měřeními při definované hodnotě útlumu nastavené na digitálním atenuátoru je zobrazen na grafu 3.18. Maximální rozptyl o velikost 8 dB se u 32 nastavených hodnot vyskytl celkově dvakrát. Naopak nejmenší rozptyl o velikosti 1 dB byl naměřen pouze jednou. Nejčastěji naměřená velikost rozptylu o velikost 4 dB byla zjištěna celkově u deseti hodnot nastaveného útlumu. Z grafu je také zřejmé že útlum je v rámci celého průběhu lineární. Odchylku od nastavené hodnoty útlumu lze tedy částečně potlačit nastavením vhodného offsetu.



Obr. 3.18: Graf odchylky nastavené hodnoty útlumu.

Závěr

Používání LPWAN technologií, které jsou navrženy pro opakované přenášení malých objemů dat na velké vzdálenosti a pro zajištění dlouhé životnosti bateriemi napájených zařízení díky nízkým vysílacím výkonům, se stalo již téměř běžnou součástí každodenního života. Společně s vysokou mírou popularity a nasazení v reálném životě, však rostou i požadavky na poskytnutí dostatečného pokrytí i v místech s horší mírou dostupnosti, jako jsou například podzemní garáže nebo odlehlé lokality. Pro správné testování a určení limitů pro spolehlivý přenos a dostatečný dosah a jejich vzájemné porovnání napříč dostupnými LPWAN technologiemi, je nezbytné mít možnost signál dostatečně utlumit. K tomuto účelu se používají nejčastěji útlumové články, které umožňují snížit intenzitu signálu na potřebnou úroveň pro měření.

Cílem této diplomové práce bylo vytvoření programovatelného útlumového členu s možností plynulého nastavení útlumu v rozsahu 0 dB až 150 dB a s rozsahem pracovní frekvence 0 Hz až 6 GHz. První kapitola diplomové práce se věnuje popisu základních principů šíření rádiových vln společně s popisem a srovnáním nejpoužívanějších bezdrátových technologií. Druhá kapitola práce je zaměřena na teoretický popis základních typů útlumových článků.

Ve třetí kapitole je popsán způsob návrhu a realizace programovatelného útlumového členu, jehož základ je tvořen digitálním 6bitovým atenuátorem s maximální pracovní frekvencí 6 GHz a maximálním útlumem 31,5 dB a využívající mikrokontrolér ATmega328P-PU.

Vytvořené zařízení umožňuje požadovanou hodnotu útlumu nastavovat pomocí rotačního enkodéru prostřednictvím SPI rozhraní v rozsahu 0 až 157,5 dB s vizualizací nastavené hodnoty na vestavěném displeji nebo programově přes USB rozhraní prostřednictvím integrovaného převodníku USB-serial, který obsluhuje konzolová aplikace vytvořená v jazyku C#. Komunikace mezi aplikací a zařízením je realizována pomocí navrženého komunikačního protokolu. Aplikace umožňuje díky jednoduchému uživatelskému rozhraní snadno nastavit nebo vyčíst hodnotu útlumu bez nutnosti fyzické obsluhy zařízení. Tato možnost najde největší uplatnění při automatizovaném způsobu měření.

Při návrhu zařízení a čtyřvrstvé desky plošného spoje bylo uvažováno použití pro obvody s charakteristickou impedancí 50 Ω . Proto bylo nezbytné zajistit charakteristickou impedanci 50 Ω i u zařízení. Toho bylo dosaženo vhodným návrhem části obvodu, která vede radiofrekvenční signál tvořené pětici digitálních atenuátorů zapojených v sérii. Pro potlačení vlivu šumu napájecího zdroje na atenuátor při vyšších frekvencích, bylo zvoleno napájení nízkošumovým regulátorem s výstupním napětím 3,3 V, napájení celého zařízení je realizováno skrze integrované USB rozhraní.

Během procesu testování zařízení bohužel došlo k jeho poškození, což v důsledku

znemožnilo provést měření v celém rozsahu nastavitelného útlumu. Měření přesnosti útlumového článku proto bylo omezeno pouze na rozsah 0–31,5 dB.

Literatura

- [1] WordPress *Techplayon* [online]. poslední aktualizace 7.9.2018 [cit. 23.10.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <http://www.techplayon.com/wp-content/uploads/2018/09/MCL-and-MPL.png>.
- [2] WordPress *Maximum Coupling Loss (MCL) and Maximum Path Loss (MPL)* [online]. poslední aktualizace 7.9.2018 [cit. 23.10.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <http://www.techplayon.com/maximum-coupling-loss-mcl-and-maximum-path-loss-mpl/>.
- [3] Jaroslav Reichel, Martin Všeticka, *Encyklopedie fyziky* [online]. poslední aktualizace 7.9.2018 [cit. 26.10.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/153-mechanicke-vlneni>.
- [4] HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, SMARAD Centre of Excellence *S-72.333 Physical layer methods in wirelesscommunication systems* [online]. poslední aktualizace 23.11.2004 [cit. 24.10.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=24&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi_-o_YyrXlAhVs8-AKHW0JDZ04FBAWMAN6BAgDEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.comlab.hut.fi%2Fopetus%2F333%2F2004_2005_slides%2FPath_loss_models&usg=A0vVaw3rTVs78790hP6g1ze00nC5.
- [5] Ana Rita Beire, Nuno Cote, Helder Pita, António Rodrigues *Automatic tuning of Okumura-Hata model on railway communications* [online]. poslední aktualizace 22.1.2015 [cit. 26.10.2019]. Dostupný pod licencí IEEE z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7014881> ISSN: 1882-5621.
- [6] International Research Journal of Engineering and Technology, Zahera Naseem, Iram Nausheen, Zahwa Mirza *PROPAGATION MODELS FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM* [online]. poslední aktualizace 22.1.2015 [cit. 26.10.2019]. Dostupný pod licencí IEEE z URL: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwii35GT2rrlAhXJVAKHdPTAj0QFjABegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fpdfs.semanticscholar.org%2Fecfc%2F65160afc36978a2a0eb2b104f8027fd29bbc.pdf&usg=A0vVaw02Ptn_UCdt2ffW3NpLzpz8 ISSN: 2395-0056.

- [7] Gary A. Thiele *Friis Transmission Over a Ground Plane: Understanding the Effects of Nonfree-Space Conditions* [online]. [cit. 25.10.2019]. Dostupný pod licencí IEEE z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8599045>.
- [8] Okumura-Hata Model for LTE, TELETOPIX.ORG *Okumura-Hata Model for LTE* [online]. [cit. 27.10.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <http://teletopix.org/4g-lte/okumura-hata-model-for-lte/>.
- [9] Mini Physics *Mini Physics* [online]. poslední aktualizace 27.6.2018 [cit. 03.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.miniphysics.com/wp-content/uploads/2011/07/electromagneticspectrum.jpg>.
- [10] Sami TABBANE. *NB-IoT Networks* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 21.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/ITU-ASP-CoE-Training-on-/Session5_NB_IoT%20networks%20web.pdf.
- [11] SlidePlayer.com Inc. *SlidePlayer.com Inc.* [online]. poslední aktualizace 26.4.2017 [cit. 03.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://slideplayer.com/slide/9430593/29/images/31/Reflection+and+diffraction+of+radio+signals.jpg>.
- [12] Wikimedia Foundation, Inc. *Wikimedia Foundation, Inc.* [online]. poslední aktualizace 19.10.2019 [cit. 04.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/Friis_Free-Space_Radio_Circuit.png.
- [13] 3.0 Česko. *3.0 Česko. WikiSkripta* [online]. poslední aktualizace 18.6.2018 [cit. 04.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://www.wikiskripta.eu/w/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum.
- [14] AspenCore. *AspenCore. Electronics Tutorials* [online]. poslední aktualizace 29.11.2018 [cit. 12.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/rf-attenuators/pi-t-resistive-attenuator-pad-circuit-design-formula.php>.
- [15] AspenCore. *AspenCore. Electronics Tutorials* [online]. poslední aktualizace 29.11.2018 [cit. 10.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/attenuators-attn1.gif>.

- [16] AspenCore. *AspenCore. Electronics Tutorials* [online]. poslední aktualizace 29.11.2018 [cit. 10.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/attenuators-attn8.gif>.
- [17] AspenCore. *AspenCore. Electronics Tutorials* [online]. poslední aktualizace 29.11.2018 [cit. 10.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/attenuators-attn22.gif>.
- [18] AspenCore. *AspenCore. Electronics Tutorials* [online]. poslední aktualizace 29.11.2018 [cit. 10.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/attenuators-attn38.gif>.
- [19] Vejlggaard, Benny; Lauridsen, Mads; Nguyen, Huan Cong; Kovács, István; Mogensen, PrebenElgaard; Sørensen, Mads. *Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT* [online]. poslední aktualizace 2017 [cit. 16.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/253177500/LPWA_capacity_nordjylland.pdf.
- [20] Tektronix. *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 11.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://public.cnrood.com/public/docs/WiFi_Physical_Layer_and_Transm_Meas.pdf.
- [21] Electronics Notes. *What is GSM EDGE / 2G EDGE Evolution* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 03.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/2g-gsm-edge/what-is-gsm-edge-evolution.php>.
- [22] Sabine Dahmen-Lhuissier. *4th Generation (LTE)* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 13.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.etsi.org/technologies/mobile/4g>.
- [23] Sami TABBANE. *IoT Long Range Technologies: Standards* [online]. poslední aktualizace 2017 [cit. 11.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2017/Nov_IOT/NBTC%E2%80%9393ITU-IoT/IoT_standards.pdf.

- [24] Eric B. *LoRa Read The Docs* [online]. poslední aktualizace 03.12.2019 [cit. 12.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://lorareadthedocs.io/en/latest/#>.
- [25] National Instruments. *Introduction to Bluetooth Device Testing From Theory To Transmitter and Receiver Measurements* [online]. poslední aktualizace 2016 [cit. 16.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: http://download.ni.com/evaluation/rf/intro_to_bluetooth_test.pdf.
- [26] Nokia. *LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 12.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://novotech.com/docs/default-source/default-document-library/lte-m-optimizing-lte-for-the-internet-of-things.pdf?sfvrsn=0>.
- [27] Tutorialspoint. *Wi-Fi - IEEE Standards* [online]. poslední aktualizace 2017 [cit. 11.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://www.tutorialspoint.com/wi-fi/wifi_ieee_standards.htm.
- [28] Vratislav Půr. *Impedanční přizpůsobení zařízení a jeho vliv na přenos informace* [online]. poslední aktualizace 2013 [cit. 16.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24886/p%C5%AFr_2013_bp.pdf?sequence=1.
- [29] AspenCore. *Passive Attenuator Tutorial about Passive Attenuators* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 25.11.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.electronics-tutorials.ws/attenuators/passive-attenuator.html>.
- [30] Digi-Key Electronics. *Digi-Key Electronics* [online]. poslední aktualizace 05.03.2013 [cit. 16.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://media.digikey.com/Renders/Silicon%20Labs%20Renders/24-QFN%20Exposed%20Pad.jpg>.
- [31] Analog Devices, Inc. *Analog Devices, Inc., HMC624A Pin Configuration* [online]. poslední aktualizace 2019 [cit. 17.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.analog.com/-/media/analog/en/products/image/pin-diagrams/hmc624a-pc.png?h=270&hash=5ED309626EE31E320FB4662BB264013CDFF2F62E>.

- [32] Analog Devices, Inc. *Analog Devices, Inc., HMC624A-EP (Rev. A)* [online]. poslední aktualizace 2019 [cit. 19.12.2019]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/HMC624A-EP.pdf>.
- [33] Wikimedia Foundation, Inc. *Wikimedia Foundation, Inc.* [online]. poslední aktualizace 2020 [cit. 29.04.2020]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://cs.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface#/media/Soubor:SPI_three_slaves.svg.
- [34] Microchip Technology Inc. *Microchip Technology Inc., ATmega328P Automotive - Complete Datasheet* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 29.04.2020]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>.
- [35] HW Kitchen *HW Kitchen – KY-040 rotační enkodér s tlačítkem* [online]. poslední aktualizace 2018 [cit. 02.05.2020]. Dostupný pod licencí Creative Commons z URL: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.hwkitchen.cz/user/shop/big/2462-1_ky-040-rotacni-encoder-s-tlacitkem.jpg?5bc5d042.
- [36] HobbyTronics Ltd. *HobbyTronics Ltd. Hobbytronics.co.uk* [online]. [cit. 04.05.2020]. Dostupný z URL: <http://www.hobbytronics.co.uk/image/cache/data/intec/lcd-20x4-blue-500x500.jpg>.
- [37] Electronicshub.org *Electronicshub Electronicshub.org* [online]. [cit. 04.05.2020]. Dostupný z URL: <https://www.electronicshub.org/wp-content/uploads/2017/06/SPI-Modes-and-Timing.jpg>.
- [38] Joe Decuir *Bluetooth 4.0: Low Energy* [online]. [cit. 07.05.2020]. Dostupný z URL: https://www.inteltek.com/wp-content/uploads/2015/09/20160330-IEEE_BLE.pdf.
- [39] Martin Woolley *Bluetooth 5 / Go Faster. Go Further.* [online]. [cit. 15.05.2020]. Dostupný z URL: <https://www.bluetooth.com/blog/exploring-bluetooth-5-going-the-distance/>.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

α	útlumová konstanta
A_{MU}	medián útlumu
AES	standard pokročilého šifrování – Advanced Encryption Standard
AMP	alternativní MAC PHY – Alternate MAC PHY
AWGN	aditivní bílý Gaussovský šum – Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binární — fázové klíčování – Binary–Phase Shift Keying
BSS Coloring	Basic Service Set Coloring
c	světelná rychlost
CAD/CAM	počítačová podpora modelování/počítačová podpora obrábění – Computer Aid Designing/Computer Aid Manufacturing
CCK	doplňkové klíčování kódu – Complementary Code Keying
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CPHA	fáze hodinového signálu – Clock Phase
CPOL	polarita hodinového signálu – Clock Polarity
CSD	vysokorychlostní přenos dat spojováním okruhů – Circuit Switched Data
CSS	Chirp Spread Spectrum
CSMA/CA	vícenásobný přístup s nasloucháním nosné a předcházením kolizím – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
d	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
DBPSK	rozdílové binární klíčování fázovým posuvem – Differential Binary Phase Shift Keying
DIP	Dual In-Line Package
DPS	deska plošného spoje
DSSS	technika přímého rozprostřeného spektra – Direct Sequence Spread Spectrum
DQPSK	diferenční kvadrurní fázové klíčování – Differential Quadrature (Quadrature) Shift Keying
\vec{E}	elektrické pole
EDR	vylepšená přenosová rychlost – Enhanced Data Rate
FEC	dopředná korekce chyb – Forward Error Correction
FET	tranzistor řízený elektrickým polem – Field Effect Transistor
FDD	duplex s frekvenčním dělením — Frequency Division Duplex
FDMA	frekvenčně dělený vícenásobný přístup – Frequency Division Multiple Access
FH	frekvenční skákání — Frequency Hopping
FHSS	frekvenční přeskakování rozprostřeným spektrem – Frequency

	Hopping Spread Spectrum
G_t	zisk vysílací antény
G_r	zisk přijímací antény
GPIO	všeobecný vstup/výstup – General Purpose Input/Output
GFSK	Gaussovo frekvenční klíčování — Gaussian Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussianova modulace s minimálním zdvihem – Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	obecná rádiová paketová služba – General Packet Radio Service
GSM	globální systém pro mobilní komunikaci – Global System for Mobile communication
\vec{H}	magnetické pole
HS	vysoká rychlost – High Speed
IDE	integrované vývojové prostředí – Integrated Development Environment
MAC	řízení přístupu k médiu – Media Access Control
MIMO	vícenásobný vstup vícenásobný výstup – Multiple-input multiple-output
MU–MIMO	více uživatelů vícenásobný vstup vícenásobný výstup – Multi-user Multiple-input multiple-output
H_{BG}	zisk základové antény
H_{MG}	zisk mobilní antény
HSCSD	vysokorychlostní přenos dat spojováním okruhů – High Speed Circuit Switched Data
IoT	internet věcí – Internet of Things
ITM	model nepravidelného terénu – Irregular Terrain Model
ISM	průmyslový, vědecký a zdravotnický — Industrial, Scientific and Medical
I²C	vnitřní integrovaný okruh – Inter-Integrated Circuit
$K_{\text{correction}}$	výkonový faktor korekce
λ	vlnová délka
L	medián ztrát šířením
LCD	Displej z tekutých krystalů – Liquid Crystal Display
LDO	Low-Dropout
LED	elektroluminiscenční dioda – Light Emitting Diode
L_{FSL}	ztráty volným prostředím
LoRaWAN	rozlehlá síť s dlouhým dosahem – Long Range Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LTE–M	Long Term Evolution category M1
LTE–eMTC	Long Term Evolution Enhancements for Machine Type

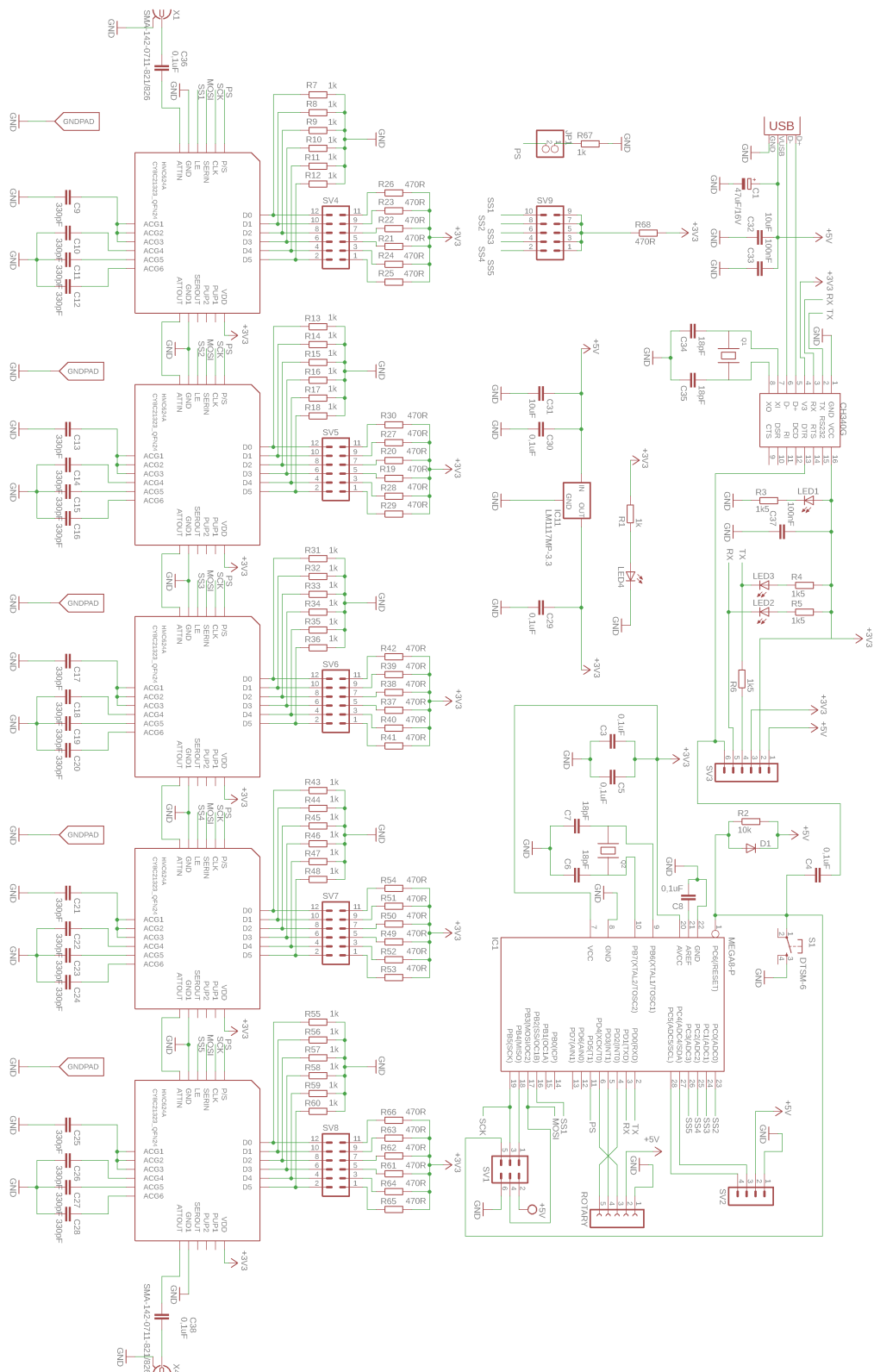
	Communications
LPWAN	nízkoenergetická rozlehlá síť – Low Power Wide Area Network
MAC	řízení přístupu k médiu – Media Access Control
MIMO	vícenásobný vstup vícenásobný výstup – Multiple-Input Multiple-Output
MU-MIMO	více uživatelů vícenásobný vstup vícenásobný výstup – Multi-user Multiple-Input Multiple-Output
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
MSB	nejvýznamnější bit – Most Significant Bit
M2M	komunikace stroj-stroj – Machine to Machine
n	index lomu
OFDM	ortogonální multiplex s frekvenčním dělením – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	ortogonální frekvenčně dělený vícenásobný přístup – Orthogonal Frequency Division Multiple Access
p	index absorpce
PIN	pozitivní intrinzická negativní – Positive Intrinsic Negative
PDIP	plastové dvouřadé pouzdro – Plastic Dual Inline Package
P_r	přijatý výkon
PSK	fázové klíčování — Phase Shift Keying
RISC	Reduced Instruction Set Computer
P_t	vyzářený výkon
QAM	kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation
QFN	Quad Flat No-leads
QPSK	kvadrurní klíčování fázovým posuvem – Quadrature Phase Shift Keying
SDA	Synchronous Data
SCL	Synchronous Clock
SC-FDMA	frekvenčně dělený vícenásobný přístup s jednou nosnou – Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCLK	Serial Clock
SF	faktor rozprostření – Spreading Factor
SMA	menší miniatura verze A – SubMiniature version A
SMD	součástka pro povrchovou montáž – Surface Mount Device
SNR	odstup signál/šum – Signal Noise Ratio
SPI	sériové periferní rozhraní – Serial Peripheral Interface
SS	Slave Select

$s(t)$	Poyntingův vektor
TDD	duplex s časovým dělením – Time Division Duplex
TDMA	časově dělený vícenásobný přístup – Time Division Multiple Access
TTL	tranzistorově–tranzistorová logika – Transistor–Transistor Logic
TWT	čas probuzení cíle – Target Wake Time
UMTS	univerzální mobilní komunikační systém – Universal Mobile Telecommunications System
UNB	velmi úzké pásmo – Ultra Narrow Band
USB	univerzální sériová sběrnice – Universal Serial Bus
v	rychlost vlnění
ω	fázová rychlost
3GPP	Partnerský projekt třetí generace – The 3rd Generation Partnership Project

Seznam příloh

A Schéma zapojení DPS	67
B Seznam součástí	68
C Technická dokumentace DPS	70
D Naměřené hodnoty	72
E Obsah přiloženého CD	74

A Schéma zapojení DPS



Obr. A.1: Schéma zapojení DPS.

B Seznam součástek

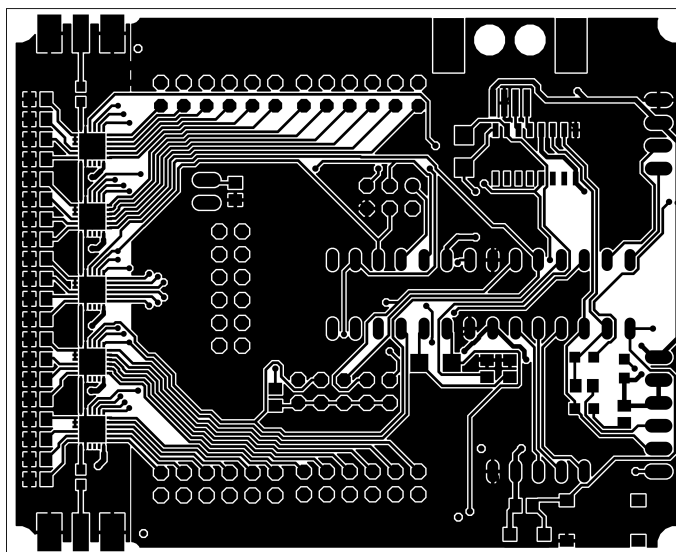
Tab. B.1: Tabulka použitých součástek 1/2.

Název	Označení	Hodnota	Množství	Poznámka
Dioda	D1	1N4148W-7-F	1	SOD-123
Rezistor	R1, R7-R18, R31-R36, R43-R48, R55-R60, R67	1 k Ω	32	SMD 0805
Rezistor	R19-R30, R37-R42, R49-R54, R61-R66, R68	470 Ω	31	SMD 0805
Rezistor	R2	10 k Ω	1	SMD 0805
Rezistor	R3-R6	1,5 k Ω	4	SMD 0805
Kondenzátor	C9-C28	330 pF	20	SMD 0805
Kondenzátor	C3-C5, C8, C29, C30	0,1 μ F	6	SMD 0805
Kondenzátor	C36, C38	0,1 μ F	2	SMD 0603
Kondenzátor	C6, C7, C34, C35	18 pF	4	SMD 0805
Kondenzátor	C31, C32	10 μ F	2	SMD 0805
Kondenzátor	C33, C37	100 nF	2	SMD 0805
Kondenzátor	C1	47 μ F/16V	1	SMD C6
LED dioda	LED1-LED3		3	SMD 0805
LED dioda	LED4		1	SMD 1206
Mikrokontroler	IC1	ATmega328P	1	DIP-28
USB-UART převod.	US1	CH340G	1	SOP-16
Reg.napětí	IC11	MCP1703A	1	SOT-223
Dig.atenuátor	IC2, IC4-IC7	HMC624A-EP	5	QFN24
Krystal	Q1, Q2	12 MHz	2	SMD 5032A
Taktilní spínač	S1	PT645	1	SMT
SMA konektor	X1, X4	50 Ω	2	
USB-B konektor	X2		1	SMT
Připojovací lišta	SV1	2x3	1	

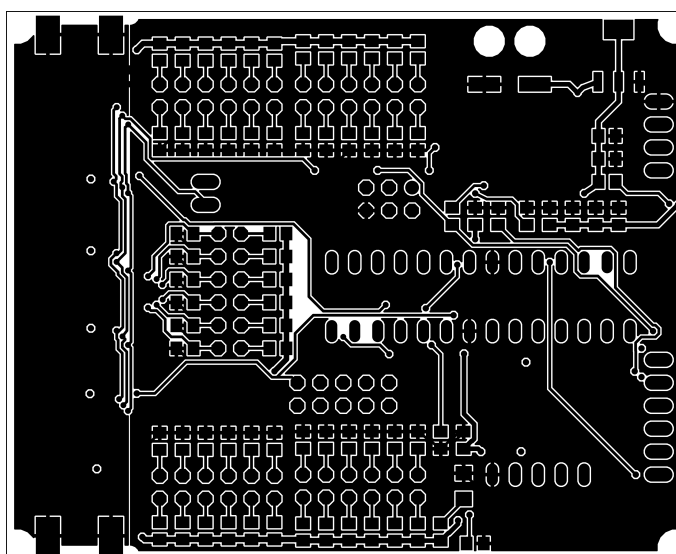
Tab. B.2: Tabulka použitých součástí 2/2.

Název	Označení	Hodnota	Množství	Poznámka
Připojovací lišta	SV2	1x4	1	
Připojovací lišta	SV3	1x6	1	
Připojovací lišta	SV4–SV8	2x6	5	
Připojovací lišta	SV9	2x5	1	
DPS zásuvka	ROTARY	1x6	1	

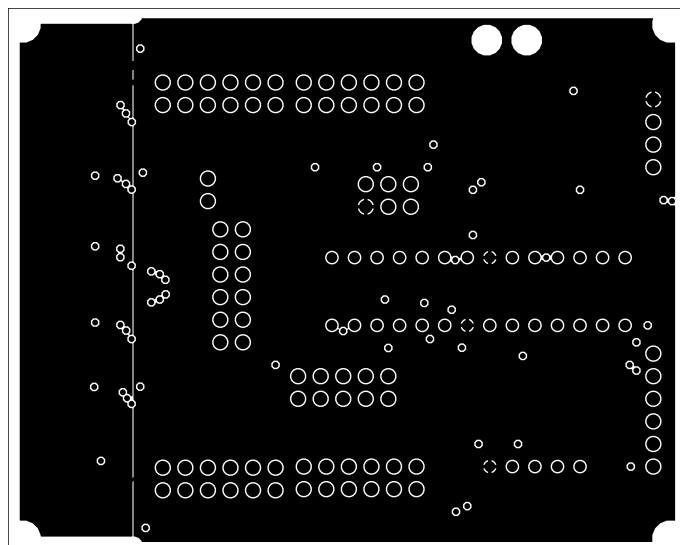
C Technická dokumentace DPS



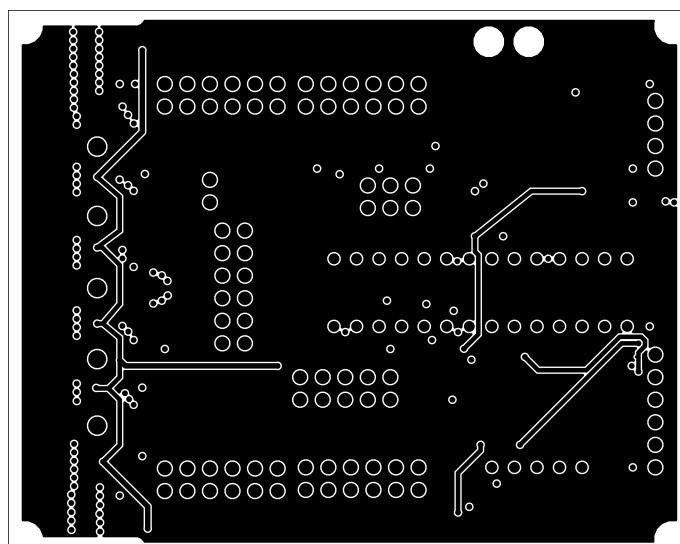
Obr. C.1: Deska plošného spoje – vrstva top.



Obr. C.2: Deska plošného spoje – vrstva bottom.



Obr. C.3: Deska plošného spoje – vrstva 2.



Obr. C.4: Deska plošného spoje – vrstva 3.

D Naměřené hodnoty

Tab. D.1: Tabulka naměřených hodnot.

	Počet měření:											
Nastavený útlum (dB):	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Průměr RSSI (dB):	Rozptyl útlumu (dB):
0	-21	-19	-21	-21	-19	-21	-18	-19	-21	-23	-20,3	-5
1	-18	-18	-23	-18	-19	-24	-23	-23	-21	-19	-20,6	-6
2	-27	-24	-24	-24	-25	-24	-24	-21	-22	-24	-23,9	-6
3	-24	-25	-24	-27	-25	-25	-24	-25	-29	-23	-25,1	-6
4	-27	-30	-25	-27	-25	-25	-27	-25	-27	-25	-26,3	-5
5	-30	-31	-31	-27	-27	-27	-31	-29	-31	-29	-29,3	-4
6	-30	-30	-30	-31	-31	-29	-33	-30	-30	-30	-30,4	-4
7	-30	-33	-33	-31	-29	-30	-31	-29	-30	-33	-30,9	-4
8	-30	-36	-31	-30	-29	-30	-28	-34	-30	-35	-31,3	-8
9	-31	-34	-33	-33	-33	-35	-33	-35	-33	-31	-33,1	-4
10	-33	-36	-33	-36	-35	-36	-34	-35	-35	-33	-34,6	-3
11	-35	-35	-35	-37	-34	-35	-35	-34	-34	-35	-34,9	-3
12	-36	-34	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-35	-35,7	-2
13	-39	-36	-37	-37	-37	-35	-35	-37	-37	-35	-36,5	-4
14	-42	-36	-37	-42	-39	-39	-42	-37	-37	-37	-38,8	-6
15	-40	-39	-39	-39	-40	-39	-39	-39	-39	-39	-39,2	-1
16	-39	-41	-39	-39	-37	-42	-42	-39	-39	-39	-39,6	-5
17	-40	-40	-41	-41	-43	-39	-43	-40	-43	-40	-41	-4
18	-42	-42	-39	-43	-42	-42	-40	-41	-41	-41	-41,3	-4
19	-42	-41	-45	-43	-43	-43	-43	-45	-43	-42	-43	-4
20	-43	-42	-43	-47	-42	-42	-43	-42	-43	-48	-43,5	-6
21	-45	-43	-47	-45	-45	-45	-45	-46	-47	-47	-45,5	-4
22	-49	-45	-48	-43	-47	-48	-45	-47	-45	-49	-46,6	-6
23	-47	-45	-47	-47	-47	-46	-47	-46	-47	-47	-46,6	-2
24	-46	-48	-49	-48	-49	-49	-48	-48	-47	-48	-48	-3
25	-48	-51	-49	-48	-51	-51	-49	-51	-49	-48	-49,5	-3
26	-46	-48	-49	-54	-54	-48	-54	-47	-51	-53	-50,4	-8
27	-51	-53	-49	-53	-51	-51	-51	-53	-51	-51	-51,4	-4
28	-53	-55	-51	-51	-53	-49	-51	-53	-53	-53	-52,2	-6
29	-52	-54	-54	-54	-54	-53	-54	-54	-53	-54	-53,6	-2
30	-52	-53	-52	-53	-54	-53	-54	-53	-55	-54	-53,3	-3
31	-53	-53	-53	-55	-53	-52	-52	-54	-54	-54	-53,3	-3
31,5	-55	-52	-53	-55	-57	-54	-52	-54	-55	-55	-54,2	-5

E Obsah přiloženého CD

```
/
├── Housingdesign/
│   ├── HousingDigAttenuatorBottom.step
│   ├── HousingDigAttenuatorTop.step
│   └── HousingDigAttenuator.f3d
├── DPS/
│   ├── GerberFiles/
│   │   ├── board.bot
│   │   ├── board.bsk
│   │   ├── board.bsm
│   │   ├── board.bsp
│   │   ├── board.DIM
│   │   ├── board.LY2
│   │   ├── board.LY3
│   │   ├── board.top
│   │   ├── board.tsk
│   │   ├── board.tsm
│   │   ├── board.tsp
│   │   ├── board.xln
│   │   └── gerberjob.grb.job
│   ├── SourceCode/
│   │   ├── ATmega328P-PU/
│   │   │   ├── attenuator.ino
│   │   │   ├── LiquidCrystalI2C.cpp
│   │   │   ├── LiquidCrystalI2C.h
│   │   │   ├── Encoder.cpp
│   │   │   ├── Encoder.h
│   │   │   └── spi.cpp
│   └── DP.Rostislav.Pokorny.pdf
```